



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

“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”

Autores:

Lagos Zamora Christian David

Sánchez Guerrero Johnny Homero

Tutor:

Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg.

AMBATO – ECUADOR

2019

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: “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”, desarrollado por los estudiantes Lagos Zamora Christian David y Sánchez Guerrero Johnny Homero, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato.

CERTIFICO:

- Que el presente trabajo experimental es original de los autores
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, 09 de julio del 2019



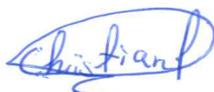
Ing. Mg. César Arroba

Tutor

AUTORÍA DE TRABAJO

Declaramos que el contenido en el trabajo experimental denominado: “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”, de la misma forma las ideas, análisis, resultados, conclusiones son auténticas y de nuestra responsabilidad como autores del presente trabajo.

Ambato, 09 de julio del 2019



Lagos Zamora Christian David

C.I: 1803476629

Autor



Sánchez Guerrero Johnny Homero

C.I: 1804746913

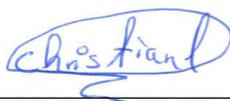
Autor

III

DERECHOS DE AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él como un documento aprovechable para la lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución.

Cedemos los derechos en línea patrimonial de nuestro Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este Trabajo Experimental, dentro de las regulaciones de la Universidad, esperando que esta reproducción no contenga una ganancia en fines de lucro y se realice respetando nuestros derechos de autor.



Lagos Zamora Christian David

C.I: 1803476629



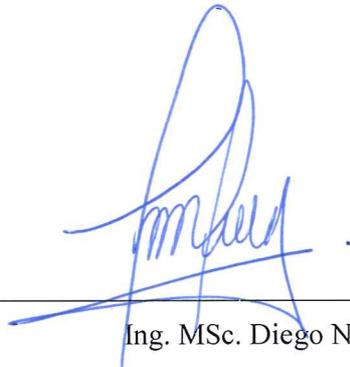
Sánchez Guerrero Johnny Homero

C.I: 1804746913

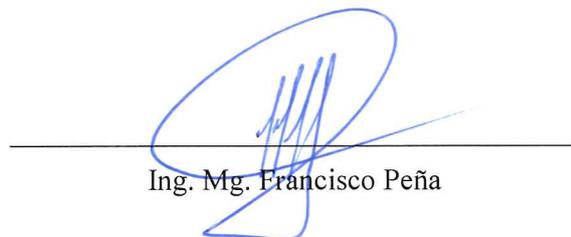
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

El Tribunal de Grado del presente Trabajo Experimental conformada por los señores docentes: Ing. MSc. Diego Núñez, e Ing. Mg. Francisco Peña, reviso y aprobó el Informe Final del Trabajo de Titulación con el tema: **“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”** elaborado y presentado por los señores: Lagos Zamora Christian David y Sánchez Guerrero Johnny Homero, de acuerdo al Reglamento de Graduación para Obtener el Título Terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Julio del 2019



Ing. MSc. Diego Núñez



Ing. Mg. Francisco Peña

DEDICATORIA

Esta investigación la dedico a Dios, por darme la vida y sabiduría para alcanzar este logro de gran importancia en mi formación humanística y profesional.

A mi padre Freddy, que ha sido mi más grande fuente de inspiración ya que con su ejemplo me ha enseñado a afrontar las adversidades de la vida.

A mi madre Bernardita, que con su amor me ha inculcado valores como la responsabilidad y el respeto fundamentales para la culminación de esta meta.

A mis familiares, en especial a mi hermano Joel por el apoyo incondicional, confianza y palabras de aliento que me han brindado a lo largo de mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros por permitirme compartir experiencias y conocimientos.

"El éxito es una ciencia, si tienes las condiciones, obtendrás el resultado."

Oscar Wilde

Lagos Zamora Christian David

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico a Dios, por haberme permitido llegar a este momento tan importante de mi formación académica profesional.

A mis padres Juan y Carmen, que son el pilar fundamental en mi vida y siempre han permanecido en los momentos clave, dándome su apoyo y comprensión durante todo el trayecto de mi carrera.

A mi hermana Elizabeth, quien fue la principal motivación para esforzarme día a día, convirtiéndome en una mejor persona.

A mis familiares, quienes siempre han estado junto a mi brindándome su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros por el apoyo mutuo y las experiencias vividas en toda nuestra vida universitaria.

“La confianza en sí mismo es el primer secreto del éxito”

Ralph Waldo Emerson

Sánchez Guerrero Johnny Homero

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por darnos el valor y las fuerzas para enfrentar las adversidades, y no decaer ante los problemas.

Queremos expresar nuestros más profundos sentimientos de gratitud al Ing. César Arroba, por ser nuestro guía en este trabajo de investigación, que, con sus conocimientos y experiencia, hemos logrado culminar con éxito.

Gracias al Ing. Francisco Peña, e Ing. Diego Nuñez, que han brindado su apoyo incondicional en el desarrollo de la presente investigación, mediante el aporte de sus conocimientos técnicos y científicos.

“Los logros de una organización son el resultado de los esfuerzos combinados de cada individuo.”

Vince Lombardi

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORÍA DE TRABAJO	III
DERECHOS DE AUTOR	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTOS	VIII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESUMEN EJECUTIVO.....	XVII
CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1. Investigación Preliminar.....	1
1.1.2. Justificación.....	3
1.1.3. Planteamiento del Problema.....	4
1.1.4. Fundamentación Teórica	5
1.1.4.1. Torre de telecomunicaciones	5
1.1.4.1.1. Tipos de torres de telecomunicaciones	5
1.1.4.1.2. Torres auto soportadas	5
1.1.4.1.3. Torres arriostradas o atirantadas	6
1.1.4.1.4. Torres monopolo	6
1.1.4.2. El diseño	7
1.1.4.2.1. Consideraciones de diseño	7
1.1.4.2.2. Herramientas y recursos de diseño.....	7
1.1.4.3. Normativa	8
1.1.4.3.1. Norma ASCE 48-11	8
1.1.4.3.2. Norma ANSI TIA 222 G.....	9
1.1.4.4. El modelado	11

1.1.4.5.	Simulación	11
1.1.4.5.1.	Generalidades de la simulación.....	12
1.1.4.5.2.	Tipos de simulación	12
1.1.4.5.3.	Etapas de la simulación.....	12
1.1.4.6.	Método de Elementos Finitos	13
1.1.4.6.1.	Ventajas, desventajas y aplicaciones.....	14
1.1.4.6.2.	Análisis estructural por elemento finitos	14
1.1.4.6.3.	Tipos de análisis estructural por elementos finitos	15
1.1.4.6.4.	Discretización.....	15
1.1.4.6.7.	Tipos de elementos.....	16
1.1.4.6.8.	Proceso para el análisis por elementos finitos, aplicando software	18
1.1.4.6.9.	Software para análisis por elementos finitos.....	19
1.1.4.7.	Matriz Rigidez	20
1.1.4.8.	El Metamodelo.....	21
1.1.5.	Hipótesis.....	23
1.1.5.1.	Variable independiente	23
1.1.5.2.	Variable dependiente	23
1.2.	Objetivos	23
1.2.1.	Objetivo General	23
1.2.2.	Objetivos Específicos	23
CAPITULO II.- METODOLOGÍA		25
2.1.	Materiales.....	25
2.1.1.	Galgas de espesores.....	25
2.1.2.	Balanza	25
2.1.3.	Reloj Comparador	26
2.1.4.	Torquímetro.....	27
2.2.	Métodos.....	27
2.2.1.	Tipo de investigación	28
2.2.2.	Plan de recolección de la información	29
2.2.3.	Recolección de la información preliminar	30
2.2.3.1.	Descripción de la estructura.....	30

2.2.3.2.	Anclaje o soporte de la estructura.....	30
2.2.3.3.	Identificación de materiales	31
2.2.3.4.	Fuerzas de viento	33
2.2.4.	Plan de procesamiento y análisis.....	33
CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		35
3.1.	Análisis y discusión de los resultados.....	35
3.1.1.	Descripción del modelo evaluado	35
3.1.1.1.	Características de fabricación y montaje	35
3.1.1.2.	Condiciones de servicio	36
3.1.2.	Modelo real de análisis.....	38
3.1.2.1.	Concepción del modelo	38
3.1.2.2.	Análisis mediante elementos finitos del modelo real	41
3.1.2.2.1.	Simulación 1	42
3.1.2.2.2.	Simulación 2	43
3.1.2.2.3.	Simulación 3	44
3.1.2.2.4.	Simulación 4	45
3.1.2.2.5.	Simulación 5	46
3.1.2.2.6.	Simulación 6	49
3.1.2.2.7.	Simulación 7	56
3.1.3.	Prototipo de análisis	64
3.1.3.1.	Concepción del prototipo.....	64
3.1.3.2.	Análisis mediante elementos finitos del prototipo.....	66
3.1.3.2.1.	Simulación de prototipo 1	68
3.1.3.2.2.	Simulación de prototipo 2	71
3.1.3.3.	Ensayo físico del prototipo	75
3.1.4.	Modelo simplificado, metamodelo.....	79
3.1.4.1.	Introducción	79
3.1.4.2.	Inferencias para el metamodelo	80
3.1.4.3.	El metamodelo	81
3.1.4.4.	Comprensión física de los elementos del metamodelo.....	83
3.1.4.5.	Obtención de las ecuaciones del metamodelo	85

3.1.4.6.	Obtención de los parámetros E, L, A e I equivalentes.....	91
3.1.4.7.	Resultados de metamodelo	92
3.1.4.7.1.	Resultados de metamodelo del prototipo	92
3.1.4.7.2.	Resultados de metamodelo del modelo real.....	94
3.1.5.	Comparación de resultados	96
3.1.5.1.	Prototipo.....	96
3.1.5.2.	Modelo real.....	101
3.1.6.	Optimización	102
3.2.	Verificación de hipótesis.....	103
CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		105
4.1.	Conclusiones	105
4.2.	Recomendaciones.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		108
ANEXOS		112
ANEXO 1.....		113
ANEXO 2.....		117
ANEXO 3.....		161
ANEXO 4.....		162
ANEXO 5.....		164
ANEXO 6.....		166
ANEXO 7.....		170
ANEXO 8.....		184
ANEXO 9.....		193
ANEXO 10.....		196

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Tipos de torres de telecomunicaciones.....	5
Figura 2.- Torre tipo monopolo.....	6
Figura 3.- Familia de elementos triangulares formado por elementos y nodos	13
Figura 4.- Elemento unidimensional	16
Figura 5.- Elementos bidimensionales	17
Figura 6.- Elementos tridimensionales.....	17
Figura 7.- Proceso de resolución de problemas empleando el método de elementos finitos	19
Figura 8.- a) Elemento de resorte único y (b) ensamblaje de tres resortes	20
Figura 9.- Elemento de resorte lineal con desplazamiento nodal positivo y convenciones de fuerza.....	21
Figura 10.- Galga de espesores	25
Figura 11.- Balanza o celda de carga	26
Figura 12.- Reloj comparador	26
Figura 13.- Torquímetro.....	27
Figura 14.- Estructura tipo monopolo de secciones poligonales.....	30
Figura 15.- Configuración del anclaje al piso de la estructura tipo monopolo	31
Figura 16.- Cartelas de refuerzo utilizadas en estructuras tipo monopolo	35
Figura 17.- Elementos de un perno A325	37
Figura 18.- Ejemplificación de una escarpa.....	38
Figura 19.- Configuración de análisis MEF para monopolo de seis secciones.....	41
Figura 20.- Comportamiento de la deformación en relación a la altura del monopolo ..	47
Figura 21.- Comportamiento del esfuerzo en relación a la altura del monopolo	47
Figura 22.- Monopolo de seis secciones a) Configuración general, b) Configuración de la junta bridada 3.....	48
Figura 23.- Prototipo equivalente a la estructura monopolo a) Configuración general y b) Junta brida de unión	66
Figura 24.- Aplicación de carga en el prototipo.....	67
Figura 25.- Refinamiento en las juntas bridadas de la estructura	67

Figura 26.- Curva de desplazamiento en función de la altura del prototipo	74
Figura 27.- Esquemmatización del modo de deformación de la estructura modelado en elementos finitos	80
Figura 28.- Elemento frame arbitrariamente orientado.....	81
Figura 29.- Esquemmatización del instante inicial y final una vez desarrollado el ensayo estático.....	81
Figura 30.- Simplificación del modelo sin interacción de las juntas bridadas.....	82
Figura 31.- Interacción existente en la junta bridada de la estructura.....	82
Figura 32.- Metamodelo con interacción de la junta bridada de unión apernada	83
Figura 33.- Esquemmatización de nodos y elementos del metamodelo	84
Figura 34.- Esquemmatización de grados de libertad por nodo del metamodelo	85
Figura 35.- Esquemmatización de la rigidez de cada elemento del metamodelo	86
Figura 36.- Desplazamiento máximo del prototipo.....	97
Figura 37.- Curvas de desplazamiento máximo en relación al número de pernos y el tipo de análisis: a) MEF con elementos sólidos, b) MEF con elementos Shell y c) Metamodelo de simulación	99
Figura 38.- Curvas de desplazamiento máximo en relación al tipo de análisis y el número de pernos utilizados en la estructura: a) 4 pernos, b) 8 pernos y c) 12 pernos.....	100
Figura 39.-Curvas de desplazamiento - altura en relación al tipo de análisis.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades acero estructural ASTM A500	31
Tabla 2.- Propiedades acero estructural ASTM A36	32
Tabla 3.- Propiedades pernos A325	32
Tabla 4.- Pretensión mínima de pernos A325	32
Tabla 5.- Velocidades de viento máximas en Ecuador	33
Tabla 6.- Consideraciones iniciales para el cálculo de la carga de viento	39
Tabla 7.- Fuerza de viento actuante en cada tramo o sección del monopolo	39
Tabla 8.- Fuerzas y momentos en cada sección del monopolo	40
Tabla 9.- Análisis de resultados de la simulación 1	42
Tabla 10.- Análisis de resultados de la simulación 4	43
Tabla 11.- Análisis de resultados de la simulación 3	44
Tabla 12.- Análisis de resultados de la simulación 4	45
Tabla 13.- Análisis de resultados de la simulación 5	46
Tabla 14.- Relación de desplazamiento y esfuerzos en función de la altura o número de secciones del monopolo	47
Tabla 15.- Análisis de resultados de la simulación 6, monopolo de seis secciones tipo sólido	49
Tabla 16.- Análisis de resultados simulación 7, monopolo de seis secciones tipo Shell	56
Tabla 17.- Comparación de resultados de desplazamiento y esfuerzos para el monopolo de seis secciones	63
Tabla 18.- Consideraciones ensayos experimentales para concepción del prototipo	65
Tabla 19.- Análisis de resultados de la simulación 8, prototipo tipo sólido	68
Tabla 20.- Análisis de resultados de la simulación 9, prototipo tipo Shell	71
Tabla 21.- Comparación de resultados de desplazamiento y esfuerzos para el prototipo	74
Tabla 22.- Desplazamientos máximos obtenidos al variar la fuerza de análisis en el prototipo	75
Tabla 23.- Elementos constitutivos del banco de ensayos	76
Tabla 24.- Ensayo físico del prototipo	77
Tabla 25.- Resultados obtenidos del ensayo físico con variación de la fuerza aplicada	79

Tabla 26.- Parámetros E, L, A e I equivalente de los elementos del metamodelo.....	92
Tabla 27.- Metamodelo de simulación del prototipo	93
Tabla 28.- Desplazamientos mediante el metamodelo en los puntos específicos del prototipo	94
Tabla 29.- Resultados de desplazamiento en relación a la fuerza aplicada del modelo simplificado.....	94
Tabla 30.- Consideraciones de análisis para el metamodelo.....	95
Tabla 31.- Resultados de desplazamiento máximo del prototipo	96
Tabla 32.- Porcentaje de variación de resultados entre el ensayo físico y los análisis realizados en el prototipo	97
Tabla 33.- Desplazamiento máximo del prototipo en función del número de pernos y el espesor de la junta.	98
Tabla 34.- Comparación de resultados de desplazamiento de bridas según el tipo de análisis.....	101
Tabla 35.- Análisis de optimización de diseño para el modelo real.....	103
Tabla 36.- Comparación de resultados entre las conexiones apernadas el modelo real y su optimización.....	103
Tabla 37.- Análisis de la variación de masa de las juntas optimizadas.....	104
Tabla 38.- Comparación del factor de seguridad de las juntas optimizadas del monopoló	104

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“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”

Autores: Lagos Zamora Christian David

Sánchez Guerrero Johnny Homero

Tutor: Ing. César Hernán Arroba Arroba, Mg.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación, se desarrolla con el fin de identificar las causas primordiales de falla en las conexiones apernadas tipo brida utilizadas en estructuras tipo monopolo sometidas a flexión debido a la incidencia de cargas de viento según las consideraciones de diseño y análisis propuestos por la Asociación de la Industria de Telecomunicaciones en la norma TIA-222-G.

La recopilación de información se realizó mediante la revisión teórica-técnica de las características funcionales y de servicio a las que se encuentran expuestas las conexiones haciendo uso de recursos bibliográficos y mediciones en campo, además se analizó el comportamiento a flexión mediante el método de elementos finitos de una estructura de 6 secciones utilizando elementos sólidos y elementos shell con la finalidad de comprobar la metodología de análisis propuesta.

El análisis experimental incluye ensayos a flexión del prototipo a escala en un banco de pruebas. Dicho ensayo se realizó en diez etapas: 1) Toma de datos del Análisis por elementos finitos, 2) Determinación de la relación altura-desplazamiento, 3) Modelado geométrico 3D de varios prototipos, 4) Ensayo por elementos finitos de los prototipos, 5) Análisis de resultados del ensayo de elementos finitos de los

prototipos, 6) Selección del prototipo más óptimo, 7) Diseño y construcción del banco de pruebas, 8) Ensayos experimentales en el banco de pruebas, 9) Toma y registro de datos de parámetros de carga y desplazamiento por medio de una balanza tipo grúa y un reloj comparador, 10) comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos y el ensayo físico.

Con el fin de optimizar las juntas estudiadas, se realizó un ensayo experimental mediante software de elementos finitos variando los espesores y el número de pernos de las juntas en la estructura de 6 secciones y el prototipo que permitan elaborar un modelo simplificado mediante la obtención de las características del comportamiento y de las ecuaciones que posibiliten reproducir la no linealidad presente en este tipo de estructuras con la ayuda de un software para resolución matricial.

Finalmente, se verificó los resultados obtenidos mediante la comprobación de la desviación de los resultados obtenidos en el metamodelo, los ensayos experimentales y del análisis FEA, optimizando el análisis a flexión de las juntas bridadas de estructuras tipo monopolo, reduciendo el tiempo de procesamiento y el costo computacional.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
FACULTY OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING CAREER

"BEHAVIOR TO FLEXION OF FLANGE-TYPE FLANGED CONNECTIONS IN MONOPOLO TYPE TELECOMMUNICATION STRUCTURES, USING THE FINITE ELEMENTS METHOD AND VALIDATION WITH A SCALE PROTOTYPE"

Authors: Lagos Zamora Christian David
Sánchez Guerrero Johnny Homero

Tutor: Ing. César Hernán Arroba, Mg.

EXECUTIVE SUMMARY

The present investigation is developed in order to identify the main causes of failure in bolted connections type flange used in structures type monopole subjected to bending due to the incidence of wind loads according to the considerations of design and analysis proposed by the Association of the Telecommunications Industry in the TIA-222-G standard.

The information was collected through a theoretical-technical review of the functional and service characteristics to which the connections are exposed, using bibliographic resources and field measurements, and the behavior of bending was analyzed using the finite element method. of a structure of 6 sections using solid elements and shell elements in order to verify the proposed analysis methodology.

The experimental analysis includes tests to flex the prototype to scale in a test bench. Said test was carried out in ten stages: 1) Analysis of finite element analysis data, 2) Determination of height-displacement relationship, 3) 3D geometric modeling of several prototypes, 4) Finite element testing of prototypes, 5) Analysis of the results of the finite elements test of the prototypes, 6) Selection of the most optimal prototype, 7) Design and construction of the test bench, 8) Experimental tests in the test bench, 9) Taking and recording data of parameters of load and displacement by means of a balance type crane

and a comparator clock, 10) comparison of the results obtained by the analysis by finite elements and the physical test.

In order to optimize the joints studied, an experimental test was carried out using finite element software, varying the thicknesses and the number of bolts of the joints in the structure of 6 sections and the prototype that allow to elaborate a simplified model by obtaining the characteristics of the behavior and of the equations that make it possible to reproduce the non-linearity present in this type of structure with the help of a software for matrix resolution.

Finally, we verified the results obtained by checking the deviation of the results obtained in the metamodel, the experimental tests and the FEA analysis, optimizing the flexural analysis of the flanged joints of monopole structures, reducing the processing time and the computational cost.

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Investigación Preliminar

En los últimos años el desarrollo tecnológico ha incrementado exponencialmente el uso de internet y telefonía móvil, aumentando el uso de torres de telecomunicaciones más optimas en su diseño y montaje [1]. Los factores ambientales y económicos juegan un papel muy importante en la búsqueda de estas nuevas alternativas. Un monopolo requiere menos espacio que asociado a su fácil instalación, se ha convertido en la alternativa ideal para las torres en celosía utilizadas [2]. Como resultado, ha habido un gran aumento en el número de monopolos instalados alrededor de las áreas pobladas utilizados para el soporte de antenas.

El principal inconveniente presentado en estructuras tipo monopolo es el análisis del comportamiento de las conexiones apernadas expuestas a fuerzas laterales externas, principalmente, la fuerza del viento [1]. Este problema ha sido estudiado previamente pero su información sigue siendo escasa, pocas investigaciones relacionadas indican factores puntuales para tener en cuenta en el análisis de este tipo de estructuras [3] [4] [5]. En la actualidad, el tema de trascendencia es, precisamente el análisis mediante elementos finitos de estructuras, permitiendo analizar su comportamiento simulando las condiciones reales de funcionamiento para la respectiva validación de diseño.

En el caso de simulaciones totales enfocan el análisis de las torres de telefonía móvil tipo monopolo, utilizando software de elemento finitos. El trabajo realizado por Rila Joseph y Jobil Varghese (2015) estudia el comportamiento de torres de telecomunicaciones de 35 y 40 metros de altura mediante el software de elementos finitos ANSYS, basado en condiciones reales de funcionamiento. Esta investigación demostró que el factor de ráfaga del viento, las dimensiones de las antenas y el efecto del viento, son los factores clave para el correcto cálculo de la carga de viento aplicada a la estructura. Por ello, concluyen que los desplazamientos y tensiones resultantes dependen fundamentalmente del criterio de diseño seleccionado para el material, modelado y cargas aplicadas al modelo de análisis [3]. Otros estudios se han enfocado en problemas actuales de ingeniería estructural

relacionados con estas estructuras. David Hawkins estudio las consideraciones de diseño y análisis para estructuras tipo monopolo propuestos en la norma TIA-222-G, empleando un análisis FEA (Finite Element Analysis) en las placas base no rigidizadas para conocer su comportamiento a tensión axial. Además, se discuten otros temas relacionados con el fortalecimiento y el refuerzo de las estructuras considerando la carga de sobreesfuerzo y fatiga. Su estudio concluyo que los rigidizadores de placa de escuadra (refuerzos) más altos tienen menos concentración de tensiones que los rigidizadores con refuerzos cortos [4]. Pese a lo anterior, los resultados obtenidos no siempre son los mismos en ambientes reales porque las estructuras están expuestas a diferentes condiciones ambientales dependiendo del lugar de instalación.

En el caso de simulaciones puntuales, la mayoría se enfoca en el estudio de juntas apernadas, articulaciones ampliamente utilizadas en estructuras de ingeniería [6].

Yu-Luan estudio un modelo dinámico no lineal simplificado. Determinó las respuestas estáticas de la estructura ensamblada con el análisis de elementos finitos, para luego modelar su comportamiento mediante resortes bi-lineales, que transforman la no linealidad de contacto en la no linealidad del material. En consecuencia, se desarrolla un sistema de masa y resorte, y se obtiene en derivación analítica un tipo especial de respuesta dinámica. Las soluciones numéricas de este trabajo revelan que el modelo dinámico no lineal simplificado se adapta mejor a la respuesta física que el modelo de haz lineal reducido convencional [7]. En este contexto, Bartłomiej y Witold investigaron el comportamiento no lineal de una torre de telecomunicación con conexiones circulares empernadas mediante dos casos: a) todos los pernos sin daños y b) con uno o más pernos rotos. El análisis se realiza aplicando un enfoque de subestructuración. Significa, un modelado separado de bridas y pernos de conexión, y luego combinarlos juntos. En conclusión, se observa que la rigidez no lineal de la conexión depende no solo de los tamaños de los elementos, sino también en gran medida de las fuerzas de pretensión en los pernos. Vale la pena señalar que las deformaciones de conexión dependen significativamente de las dimensiones de la brida. Las diferencias en las deformaciones de dos torres, no parecen muy significativas desde el punto de vista estructural. Sin embargo, en algunos casos, un tornillo extraído provoca un aumento significativo de las tensiones en los tornillos adyacentes [8]. De igual manera, los estudios realizados por

Wang, Zong y Shi [9], Pavlovic y otros [10] permiten verificar el modelo de elementos finitos mediante resultados experimentales, utilizado para analizar comportamiento a flexión de las conexiones de placa tipo brida, demostrando que los resultados virtuales son precisos y confiables.

El presente trabajo está motivado por los estudios citados con anterioridad, ya que resulta de gran interés ingenieril tratar de entender el comportamiento de las conexiones apernadas tipo brida en estructuras tipo monopolo utilizadas como torres de telecomunicaciones en Ecuador. Por lo tanto, el estudio se desarrolla con el fin de identificar las causas primordiales de falla en las conexiones apernadas; realizando ensayos experimentales que permitan generar una visión detallada del comportamiento de la estructura, y su posterior verificación empleando simulaciones con el método de elementos finitos ; comprobando la desviación de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y del análisis FEA que permitan proponer una alternativa para mejoramiento del desempeño de este tipo de estructuras.

1.1.2. Justificación

Las conexiones apernadas tipo brida son la forma más común utilizadas para la unión de tubos facetados en estructuras metálicas tipo monopolo. Un monopolo es una estructura visualmente discreta, que requiere de un pequeño espacio para instalarse, reduciendo su impacto en la imagen urbana y convirtiéndose en una excelente alternativa para el soporte de antenas de telecomunicaciones [11]. El monopolo está formado de secciones de tubos facetados de acero generalmente de 8 a 16 lados y 6 m de longitud por sección, permitiendo alcanzar alturas entre 12 a 42 metros [12]. El ensamblaje de las secciones se realiza mediante bridas empernadas que facilitan la instalación de las estructuras [13].

Tanto la estructura como las conexiones apernadas están sometidas a diversas cargas laterales [14], principalmente el viento [15]; ante este hecho, un incorrecto dimensionamiento de la estructura, especialmente de sus conexiones, se evidenciará inicialmente con pequeñas deformaciones [16], mismas que conjuntamente a un movimiento repetitivo provocan fatiga en pernos y placas de las juntas [17]; provocando severos daños en la estructura llegando al colapso de esta.

Según lo solicitado por la comisión TIA TR – 14.7 (Telecommunications Industry Association), donde indica que es necesario el análisis por medio de elementos finitos para este tipo de estructuras, además requiere de ensayos experimentales para verificar el comportamiento real antes de su instalación [4]. Sin embargo, la falta de estas consideraciones en la etapa de diseño ha provocado la falla de algunas de las estructuras instaladas en nuestro país.

Esta investigación, se desarrolla con el fin de identificar las causas primordiales de falla en las conexiones apernadas tipo brida utilizadas en un monopolo; realizando ensayos experimentales que permitan generar una visión detallada del comportamiento de la estructura, y su posterior verificación empleando simulaciones con el método de elementos finitos [9]; comprobando la desviación de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y del análisis FEA que permitan proponer una alternativa para mejoramiento del desempeño de este tipo de estructuras.

El desarrollo del proyecto tiene la factibilidad por contar con los recursos necesarios para su correcta ejecución y cumplimiento de las metas de estudio propuestos, garantizando una investigación veraz que ayude al correcto análisis y diseño de estructuras tipo monopolo.

1.1.3. Planteamiento del Problema

En la actualidad las conexiones bridadas son las más utilizadas en el montaje de estructuras tipo monopolo. Es por ello que en la presente investigación se realizará el análisis a flexión considerando los parámetros de diseño referentes a dimensiones, materiales, cargas y condiciones de servicio, generando un modelo tridimensional que permita simular las condiciones antes descritas mediante la utilización de un software de elementos finitos, evaluando desplazamientos y estados tensionales presentes en las juntas apernadas.

El diseño de una estructura tipo monopolo mediante conexiones apernadas tipo brida de tubos facetados involucra la simplificación del modelo de análisis por elementos finitos, que permita la construcción de un equipo para la realización de ensayos físicos, simulando las condiciones de mayor sollicitación aplicadas a un prototipo a escala, optimizando los aspectos que intervienen en el dimensionamiento, montaje y

funcionamiento de este tipo de estructuras, mejorando su desempeño y prolongando su vida útil.

1.1.4. Fundamentación Teórica

1.1.4.1. Torre de telecomunicaciones

Una torre de telecomunicación es utilizada como soporte de las antenas que permiten la transmisión de señal de telefonía móvil e internet. Sus formas y tamaños varían según la necesidad y las condiciones del sitio en que serán colocadas.

1.1.4.1.1. Tipos de torres de telecomunicaciones

Varían de acuerdo con las necesidades y las condiciones del lugar en donde van a prestar servicio. La mayoría están arregladas mediante perfiles y ángulos de acero que se unen por medio de pernos, remaches o soldadura. Su altura depende de los requerimientos de funcionamiento de esta. En la actualidad existen muchas empresas dedicadas al diseño y construcción de este tipo de estructuras. Las más comunes se muestran en la figura 1, siendo: torres auto soportadas, torres arriostradas y torres monopolo.

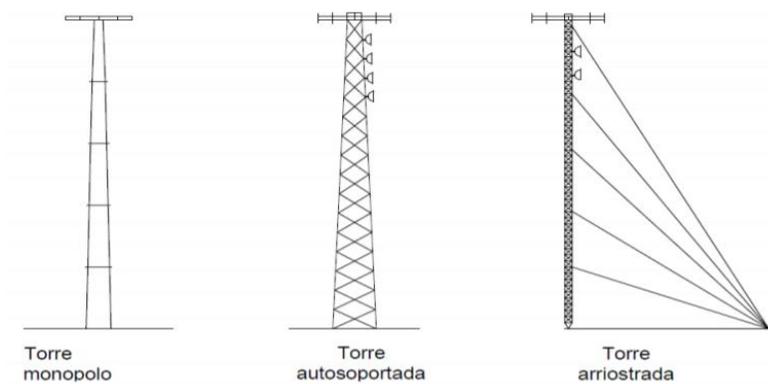


Figura 1.- Tipos de torres de telecomunicaciones [18]

1.1.4.1.2. Torres auto soportadas

Son construidas tanto para zonas urbanas como rurales. La cimentación de la torre de resistir las condiciones de servicio a la que se encuentra expuesta la torre. Su geometría y diseño depende principalmente del estudio de campo en donde juegan un papel importantísimo la altura, la ubicación y los criterios de diseño de cada fabricante. [18]

1.1.4.1.3. Torres arriostradas o atirantadas

Principalmente utilizadas para instalar antenas en puntos específicos, por lo que su construcción se la hace sobre edificaciones ya existentes. Su característica principal es que cuentan con varios tirantes o arriostres que conectan la estructura a soportes fijos ubicados a diferentes distancias. Los cables usualmente están tensados con el 10% de la resistencia nominal de catálogo, con el objeto de obtener un mayor factor de seguridad, que resista correctamente las variaciones de los estados de carga máximo a la que pueda estar expuesta la estructura. [18]

1.1.4.1.4. Torres monopolo

Muy utilizadas en zonas urbanas, donde la imagen y la estética del lugar de instalación de la torre sea mínimamente afectado en el aspecto visual. Su característica principal es que pueden ser instaladas en espacios reducidos de terreno y se pueden adornar o camuflar hasta el punto que se conjugue con la vegetación del entorno. Se debe destacar que la parte clave en este tipo de torres es la cimentación, capaz de soportar todos los efectos de la misma.



Figura 2.- Torre tipo monopolo [18]

Los monopolos están hechos de secciones de tubería de diámetro grande conformado de forma poligonal y unido por conexiones de brida externas o internas, como se observa en la figura 2. Referente al anclaje, algunos monopolos pueden ser enterrados directamente en la tierra, aunque el método más común es unir el poste mediante pernos de anclaje a un bloque de cimentación. [18]

1.1.4.2. El diseño

Se define como la manera correcta de formular un plan para satisfacer una necesidad concreta o solucionar un problema, mediante la utilización conjunta de herramientas ingenieriles que permitan la creación de un producto terminado funcional, útil, confiable, seguro, y sobre todo que se pueda fabricar y comercializar fácilmente [19].

1.1.4.2.1. Consideraciones de diseño

Son características de las que dependen fundamentalmente el diseño de un elemento o sistema, de entre las más importantes se pueden citar:

- Calidad
- Funcionalidad
- Resistencia
- Confiabilidad
- Economía
- Mantenimiento
- Consideraciones legales
- Consideraciones medioambientales

1.1.4.2.2. Herramientas y recursos de diseño

Las herramienta y recursos que dispone un ingeniero para solucionar problemas de diseño, en la actualidad se presentan en una gran variedad. Se puede iniciar con un microordenador hasta el manejo de software robustos de diseño, capaces de diseñar, analizar y simular un elemento o sistema mecánico de manera fácil y sencilla [19].

Existen diferentes herramientas computacionales que permiten la creación de diseños y modelos tanto 2D como 3D mediante Diseño Asistido por Computadora (CAD), capaces de brindar propiedades esenciales para la generación de un diseño óptimo. Varios de los CAD utilizados y reconocidos son AutoCAD, Aries, SolidWorks, entre otros. Por otro lado, existen también softwares de diseño CAE o Ingeniería Asistida por Computadora; se presenta en dos categorías: basados en solucionar problemas netamente de ingeniería

y/o no específicamente para ingeniería. Los softwares más comunes asociados al diseño CAE son Algor, Ansys, Fluent, etc y Excel, MatLab, MathCad, respectivamente.

1.1.4.3. Normativa

El conjunto de especificaciones establecidas para lograr uniformidad, eficiencia y cantidad específico de partes, materiales o procesos, es conocido como norma; las normas de referencia que regirá la presente investigación son la ASCE 48-11 para el diseño de la estructura y la TIA 222-G para el cálculo de cargas.

1.1.4.3.1. Norma ASCE 48-11

La presente investigación se basa en esta Norma ASCE 48-11 debido a que no existe un documento específico para el diseño de torres de telecomunicaciones tipo monopolo. De manera general, se describe a la norma como estándar de diseño de estructuras de postes de acero de transmisión aplicado a estructuras de acero tubulares de polos simples y múltiples conformadas en frío que soportan líneas de transmisión eléctricas aéreas.

Los parámetros de diseño son aplicables a las estructuras con soporte y las autoportantes que utilizan una variedad de tipos de cimientos, incluidos cajones de hormigón, tablestacas de acero y empotramiento directo. La norma describe los criterios clave que deben considerarse en el diseño estructural, los detalles, la fabricación, las pruebas, el ensamblaje y el montaje de estas estructuras. Esta norma es una revisión de ASCE / SEI 48-05 y proporciona algunas revisiones a fórmulas basadas en otros estándares actuales de la industria. Además, la norma incluye un comentario detallado y apéndices con información explicativa y complementaria diseñada para proporcionar al usuario información sobre aclaraciones y referencias.

La información presentada se ha preparado de acuerdo con los principios de ingeniería establecidos utilizando información de vanguardia y está destinada a información general. Si bien se han realizado todos los esfuerzos para garantizar su exactitud, no se debe confiar en la información para ninguna aplicación específica sin la consulta de un ingeniero competente para determinar su idoneidad. Nada en la Norma debe interpretarse para alterar o subvertir los requisitos de cualquier código o autoridad existente que tenga jurisdicción sobre la instalación. Además, se pueden utilizar métodos y materiales

alternativos a los aquí indicados, siempre que el ingeniero pueda demostrar su idoneidad para todas las agencias y autoridades [20].

1.1.4.3.2. Norma ANSI TIA 222 G

De manera resumida se presentan a continuación las fórmulas de cálculo de las cargas de viento que se aplica sobre la estructura, sin embargo, existen múltiples variables que se describen de manera rápida, por ello se recomienda consultar la norma ANSI TIA 222 G para una mayor comprensión sobre el método de cálculo.

Disposiciones generales

Las antenas y las estructuras que soportan antenas tienen geometrías y características de respuesta poco habituales frente a las cargas de viento. Los requisitos de esta Norma toman en cuenta los efectos de amplificación de las cargas que provocan las ráfagas de viento en resonancia con las vibraciones en el sentido del viento de las estructuras auto soportadas y atirantadas que soportan antenas.

Cargas

Esta sección proporciona requisitos de carga mínimos para antenas y estructuras que soportan antenas.

Cargas permanentes

Carga permanente, D: Peso de la estructura y los accesorios excluyendo las riendas y, para el diseño de las fundaciones, el peso del suelo y la subestructura

Carga permanente de las riendas, Dg: Peso de todo el conjunto de las riendas, incluyendo las riendas propiamente dichas, los accesorios en los extremos y los aisladores.

Cargas de viento

Carga de viento de diseño

La carga de viento de diseño deberá incluir la suma de las fuerzas de viento de diseño horizontales aplicadas a la estructura en la dirección del viento más las fuerzas de viento de diseño sobre las riendas y los accesorios. Se deberá asumir que todos los accesorios, incluyendo las antenas, soportes y cables, permanecerán intactos y unidos a la estructura.

La fuerza de viento de diseño, F_w , se deberá determinar de la siguiente manera:

$$F_w = F_{ST} + F_A + F_G \quad (1)$$

Donde:

F_{ST} = fuerza de viento de diseño sobre la estructura

F_A = fuerza de viento de diseño sobre los accesorios

F_G = fuerza de viento de diseño sobre las riendas

Fuerza de viento de diseño sobre la estructura

La fuerza de viento de diseño, F_{ST} , aplicada a cada sección de una estructura se deberá determinar de la siguiente manera:

$$F_{ST} = q_Z G_h (EPA)_S \quad (2)$$

Donde:

F_{ST} = fuerza de viento de diseño horizontal sobre la estructura en la dirección del viento

q_Z = presión dinámica

G_h = factor de ráfaga

$(EPA)_S$ = área proyectada efectiva de la estructura

Fuerza de viento de diseño sobre los accesorios

La fuerza de viento de diseño sobre los accesorios (ya sean puntuales o lineales), F_A , se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_A = q_Z G_h (EPA)_A \quad (3)$$

Donde:

q_Z = presión dinámica

G_h = factor de ráfaga

$(EPA)_A$ = área proyectada efectiva del accesorio

Fuerza de viento de diseño sobre las riendas

La fuerza de viento de diseño sobre las riendas, F_G , se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_G = C_d d L_G q_Z G_h \sin^2 \theta_g \quad (4)$$

Donde:

F_G = fuerza aplicada normal a la cuerda de la rienda en el plano que contiene a la cuerda y al viento.

C_d = coeficiente de resistencia aerodinámica para riendas

d = diámetro de la rienda

L_G = longitud de la rienda

θ_g = ángulo verdadero de incidencia del viento respecto de la cuerda de la rienda

En el caso del análisis de monopolo, se omite el cálculo de la fuerza de viento de diseño sobre las riendas, por el hecho que no existen [21].

1.1.4.4. El modelado

Se define como el proceso necesario para representar un objeto, sistema o idea mediante un modelo, con el fin de entenderlo, explicarlo o mejorarlo.

La habilidad para analizar el problema, resumir sus características, seleccionarlas y modificarlas dependiendo de las necesidades del sistema hasta obtener aproximaciones útiles, se conoce como el arte de modelar.

Según [22], un buen modelado persigue una serie de pasos, de manera general tenemos:

1. Definir objetivos
2. Analizar el sistema real
3. Simplificar el problema
4. Buscar analogías
5. Considerar un ejemplo numérico del problema
6. Determinar las variables de interés
7. Escribir datos obvios
8. Escribir ecuaciones que describen fenómenos y relacionan las variables de interés
9. Si se tiene un modelo manejable, hay que enriquecelo y simplificarlo.

1.1.4.5. Simulación

Una simulación se puede definir como un proceso que experimenta mediante un modelo simplificado, el mismo que representa y/o reemplaza a la versión real.

1.1.4.5.1. Generalidades de la simulación

La simulación permite conocer las reacciones del proceso ante cualquier fenómeno previas a su ejecución real y a su vez formular acciones que puedan mejorar su desempeño. También, evita costos innecesarios, brinda seguridad y sobre todo garantiza de que un sistema esta apto o no para su aplicación en la vida real [22].

En la actualidad una simulación representa una potente herramienta que facilita el estudio de un sistema convenientemente que tiene una solución matemática compleja, o que en su realidad no exista.

1.1.4.5.2. Tipos de simulación

Acorde a la naturaleza del modelo de análisis y según [22], una simulación puede ser:

- Simulación identidad. – Se representa con un modelo réplica precisa del sistema real.
- Simulación cuasi-identidad. - Se representa con un modelo ligeramente simplificado del real.
- Simulación de laboratorio. - El modelo se expone y se controla mediante condiciones de laboratorio.
- Simulación por ordenador. – El modelo se basa en un lenguaje computacional de forma simbólica.

1.1.4.5.3. Etapas de la simulación

De manera general, [22] menciona que una simulación consta de las siguientes etapas:

- Formular el problema mediante objetivos para la simulación.
- Definir el sistema considerando límites y condiciones a las que este expuesto.
- Formular el modelo considerando los aspectos relevantes del sistema real.
- Recolectar datos necesarios para el sistema, mismos que debe ser adaptados al modelo.
- Implementar el modelo a un ordenador mediante un lenguaje de programación.
- Verificar el modelo desarrollado para evitar errores.
- Validar el modelo en base a la exactitud con la que fue desarrollado.
- Diseñar experimentos en base a las características, tipo, tiempo y número de simulaciones necesarias.

- Experimentar con las simulaciones de diseño previo.
- Implementar y verificando su buen funcionamiento.
- Documentar la información técnica para un posterior perfeccionamiento.

1.1.4.6. Método de Elementos Finitos

Constituye un método de cálculo destinado a resolver problemas de ingeniería, basado en la división de una estructura o sistema mediante elementos de estudio sencillos que posteriormente se reconstruyen mediante el ensamblaje de cada elemento para así predecir su comportamiento de forma global.

Utiliza múltiples conexiones vinculadas entre sí, originando un sistema de ecuaciones que deben resolverse numéricamente. Este método se basa en la representación de un cuerpo mediante subdivisiones denominados elementos, mismos que se conectan entre si mediante puntos denominados nodos, como se muestra en la figura 3.

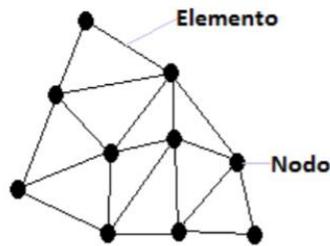


Figura 3.- Familia de elementos triangulares formado por elementos y nodos [23]

Un elemento finito es una región en el espacio en la cual la función es interpolada de los valores nodales sobre la frontera de la región, de tal manera que la continuidad dentro los elementos tiene a ser mantenida en el ensamble.

Como se menciona en [23], los pasos para un análisis con elementos finitos son:

- División de la estructura o medio continuo en elementos finitos. Mediante programas generadores de redes o conocidos como procesadores.
- Formulación de las propiedades de cada elemento. Determinar las condiciones nodales asociados al elemento a ser analizado.
- Ensamble de los elementos para obtener un modelo con elementos finitos de la estructura.
- Aplicación de cargas conocidas.

- Aplicación de condiciones de frontera.
- Resolver las ecuaciones algebraicas lineales.
- Cálculo de los índices de análisis requeridos.

1.1.4.6.1. Ventajas, desventajas y aplicaciones

De acuerdo al trabajo realizado en [23] las principales ventajas que caracteriza un análisis por elementos finitos, son:

- Resuelve problemas basados con elementos no isotrópicos
- Facilita el problema mediante la idealización al todo como un ensamble de elementos discretos o elementos finitos.
- Muestra resultados muy apegados a la realidad.
- Presenta soluciones en menor tiempo que lo métodos tradicionales.
- Resuelve problemas analíticamente imposibles.
- Minimiza la fase de experimentación

Los resultados obtenidos dependen fundamentalmente del grado de aproximación tanto del tamaño como del tipo de elemento utilizado, así como también, de las funciones de interpolación aplicadas para la solución del problema.

El método por elementos finitos ha tenido un gran desarrollo por lo que sus aplicaciones son múltiples y de gran importancia para la ingeniería. En el ámbito estructural permiten el análisis de esfuerzos, pandeo, vibración entre otros. Sin embargo, posee aplicaciones no precisamente estructurales tales como transferencia de calor, comportamiento de líquidos y distribuciones eléctricas.

1.1.4.6.2. Análisis estructural por elemento finitos

El análisis estructural con elementos finitos es un procedimiento matemático enfocado en determinar deformaciones, esfuerzos y reacciones existentes a partir de desplazamientos nodales presentes en un modelo que representa o simula una estructura sometida a condiciones reales de servicio.

Es muy confundido básicamente con aplicaciones relacionadas a la construcción e ingeniería civil, sin embargo, este método tiene muchos más usos y aplicaciones como es

el caso de estructuras o sistemas automotrices, aeronáuticos, navales y sobre todo componentes mecánicos. [24]

1.1.4.6.3. Tipos de análisis estructural por elementos finitos

Existen varios tipos de análisis estructural que aplican el método de elementos finitos, según [24] tenemos los siguientes:

Análisis estático. - Se enfoca al análisis de los efectos que provoca una carga estable sobre una estructura, tales como velocidades, rotaciones y gravedad, sin incluir efectos de la inercia y amortiguamiento como variables del tiempo.

Análisis transitorio. - Brinda una respuesta dinámica del componente o estructura analizada bajo cargas variables en función del tiempo, considerando los efectos de la inercia y amortiguamiento, mismo que generan un mayor costo computacional.

Análisis modal. - Utilizado para determinar las características vibratorias tales como frecuencias naturales y modos de vibración de una estructura. Constituye un punto de partida para el diseño que se puede complementar con un estudio estático o dinámico.

Análisis armónico. - Evalúa el comportamiento de un elemento o estructura sometido a cargas cíclicas o periódicas, que permiten el diseño y la verificación de componentes que requieran alta resistencia a vibración y fatiga.

Análisis dinámico explícito. - Se enfoca en la resolución de problemas dinámicos que generan efectos importantes en periodos cortos de tiempo, como explosiones o colisiones que dan lugar a grandes deformaciones y no linealidades.

1.1.4.6.4. Discretización

La discretización consiste en la división de un cuerpo en partes más pequeñas constituyendo un modelo, que permite la evaluación de cada elemento o parte mediante la formulación de ecuaciones que combinadas entre ellas brindan una solución completa del sistema.

La discretización o mallado es la parte fundamental del análisis por el método de elementos finitos, transforma un modelo continuo en un modelo con número finito de elementos de un tamaño determinado que se aproxima al modelo real. Como se sabe,

ningún programa obtiene resultados totalmente exactos, pero con una buena definición de las propiedades del mallado se puede obtener una solución lo más aproximada posible. La efectividad del mallado depende principalmente de una distribución uniforme de elementos, tanto de tamaño como de forma. Se basa en dos criterios; por una parte, la utilización de elementos con tamaño pequeño para generar resultados útiles y por otra, la utilización de elementos con tamaños grandes para reducir el costo o esfuerzo computacional. Este es un gran dilema al momento de discretizar un sistema, por ello es recomendable encontrar un balance de criterios que permitan obtener resultados veraces y constantes. [25]

En la mayoría de softwares, la etapa de discretización se presenta con diversos tipos de elementos con formas y propiedades diferentes, que deben seleccionarse cuidadosamente dependiendo de la forma del elemento y del tipo de análisis a realizar. Otro factor clave a considerar es el número de elementos, debido a que a mayor número de elementos mayor será el gasto computacional, aunque, una malla bien refinada brindara resultados más exactos. [26]

1.1.4.6.7. Tipos de elementos

Los elementos empleados para la discretización o mallado de un problema son diversos y dependen del análisis a realizarse como se explican en [26], básicamente se clasifican en tres grupos:

Elementos Unidimensionales. – Conocidos como elementos línea, poseen dos nodos y son empleados comúnmente para representar una viga, figura 4.

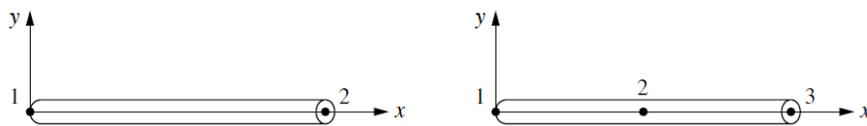


Figura 4.- Elemento unidimensional [27]

Elementos Bidimensionales. – Conocidos como elementos planos o superficiales que se presentan en forma de triángulos o cuadriláteros mismos que poseen tres y cuatros nodos respectivamente, como se muestra en la figura 5. Cada nodo se ubica en el vértice de la superficie creada, sin embargo, se pueden añadir nodos adicionales tanto a las aristas como

a la superficie. La forma más común es añadir un nodo al centro de la arista o de la superficie.

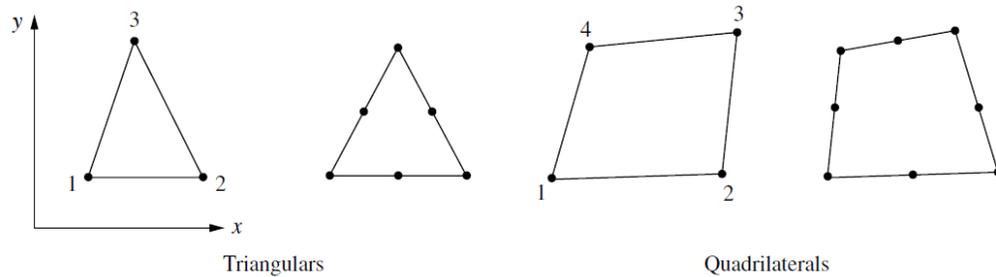


Figura 5.- Elementos bidimensionales [27]

Elementos Tridimensionales. – Conocidos como elementos sólidos, se presentan en forma de tetraedros o hexaedros, al igual que en los bidimensionales sus nodos se ubican en los vértices, pero de ser necesario se pueden incorporar nodos en las aristas o en las caras, figura 6.

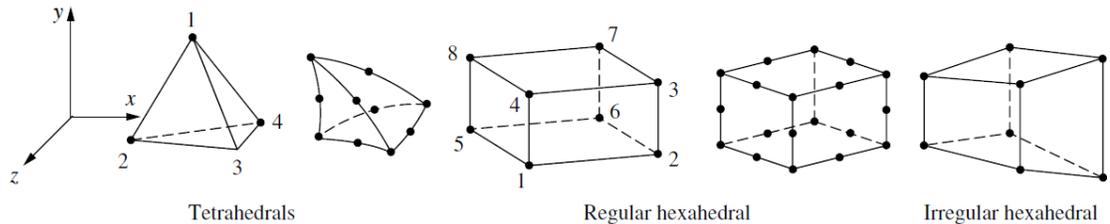


Figura 6.- Elementos tridimensionales [27]

1.1.4.6.8. Selección del tipo de elemento y recomendaciones para el mallado

La elección de los elementos a utilizarse depende principalmente del tipo de análisis que se desea realizar y de la calidad de resultados que se desea obtener. Por ello, es necesario obtener un modelo digital simplificado que permita identificar geometrías complejas, con irregularidades o discontinuidades que afecten la calidad de malla y eliminarlas.

Hay que tener en cuenta también que el uso de elementos tridimensionales incrementa el gasto computacional, considerándose relativamente alto. Una alternativa correcta es el uso de elementos bidimensionales que permiten una excelente aproximación en el cálculo de esfuerzos y deformaciones. Sin embargo, de ser posible se debe simplificar el modelo a elementos unidimensionales, como es el caso de armaduras y pórticos. [26]

Una vez simplificado el modelo y seleccionado el tipo de elementos a utilizar, se deben tener en cuenta ciertos parámetros con el fin de obtener mejores resultados:

- Posicionar los nodos donde se requieren obtener resultados.
- Conservar una malla uniforme siempre y cuando sea posible.
- Usar básicamente elementos hexaédricos o en caso de irregularidades tetraédricos.
- Refinar el mallado en las zonas de interés para los resultados.
- Conservar la proporcionalidad entre el tamaño de los elementos.

1.1.4.6.8. Proceso para el análisis por elementos finitos, aplicando software

La resolución de problemas de ingeniería requiere condiciones y parámetros diferentes para cada caso, así como también la utilización de un software o programa especialmente diseñado para llevarlo a cabo. Por ende, no existe un proceso específico a aplicarse en la resolución de problemas mediante el método de elementos finitos, pero, [28] describe de manera general el proceso cómo sigue a continuación:

Pre proceso. - Se definen las condiciones necesarias previos a la resolución del problema.

- Modelado, es la representación geométrica lo más cercana o aproximada a la real.
- Discretizado, es la división del modelo en múltiples elementos y nodos.
- Definición de las propiedades de los elementos, es la asignación de material, conexiones y vínculos entre nodos y formulaciones.
- Definición de las condiciones de borde, es la asignación de cargas, grados de libertad y demás condiciones que aproximen a las circunstancias reales del problema.

Solución. - En esta etapa se relacionan las condiciones ya definidas en el pre proceso, para analizarlas y resolverlas mediante ecuaciones en cada nodo, generando la solución en base al análisis realizado. En esta etapa el usuario no tiene control sobre el análisis ya que el ordenador lo realiza de manera autónoma aplicando algoritmos de resolución o solver de cada programa.

Post proceso. - Etapa en la que se visualizan los resultados de forma tabular o gráfica, aplicando escalas de colores que permitan identificar, interpretar y representar los resultados de manera fácil y práctica, permitiendo validar la veracidad de los mismos. En

esta etapa se puede reanalizar el problema reajustando las condiciones y parámetros de análisis.

De manera simplificada se muestra a continuación el proceso de solución aplicando el método de elementos finitos, figura 7.

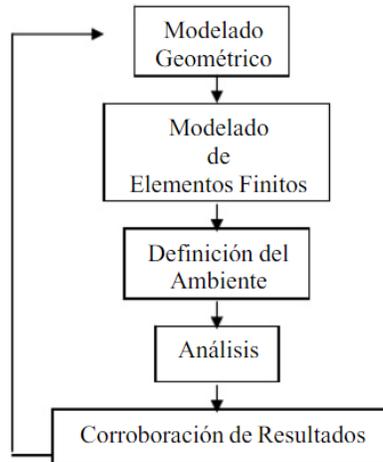


Figura 7.- Proceso de resolución de problemas empleando el método de elementos finitos [29]

1.1.4.6.9. Software para análisis por elementos finitos

A nivel mundial existen ya una gran variedad de software especializados para la resolución de problemas aplicando el método de elementos finitos, desde algunos populares con capacidad de realizar análisis de diferentes tipos, así como también otros especializados en aplicaciones de ingeniería específicas, como se especifica en [29]. Los más comunes encontrados son:

- Abaqus
- Advance Desing
- Ansys
- Autodesk simulation
- DYNA 3D
- Hyperworks
- LS – DYNA
- SAP 2000

1.1.4.7. Matriz Rigidez

La familiaridad con la matriz de rigidez es esencial para comprender el método de rigidez. Definimos la matriz de rigidez de la siguiente manera: Para un elemento, una matriz de rigidez $[k]$ es una matriz tal que:

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (5)$$

donde $[k]$ relaciona los desplazamientos nodales $\{d\}$ con las fuerzas nodales $\{f\}$ de un solo elemento, como el resorte que se muestra en la Figura 8a.

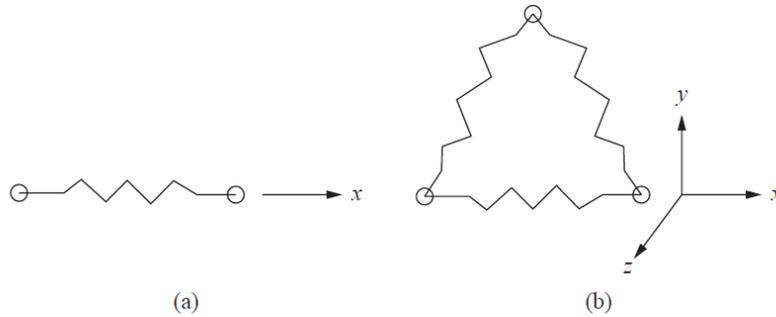


Figura 8.- a) Elemento de resorte único y (b) ensamblaje de tres resortes [27]

Para una estructura continua comprendida por una serie de elementos, como se muestra en el ensamblaje de resortes de la Figura 8b, la matriz de rigidez $[K]$ se relaciona con la coordenada global (x, y, z) desplazamientos nodales $\{d\}$ a las fuerzas globales $\{F\}$ de todo el medio o estructura, tal que:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (6)$$

Donde $[K]$ representa la matriz de rigidez de todo el conjunto de muelles.

Derivación de la matriz de rigidez

Usando el enfoque de equilibrio directo, ahora derivaremos la matriz de rigidez para un resorte lineal unidimensional, es decir, un resorte que obedece la ley de Hooke y resiste las fuerzas solo en la dirección del resorte. Considere el elemento de resorte lineal que se muestra en la Figura 9. Los puntos de referencia 1 y 2 están ubicados en los extremos del elemento. Estos puntos de referencia se denominan nodos del elemento de resorte. Las fuerzas nodales locales son f_{1x} y f_{2x} para el elemento de resorte asociado con el eje local x . El eje local actúa en la dirección del resorte para que podamos medir directamente los

desplazamientos y las fuerzas a lo largo del resorte. Los desplazamientos nodales locales son u_1 y u_2 para el elemento de resorte.

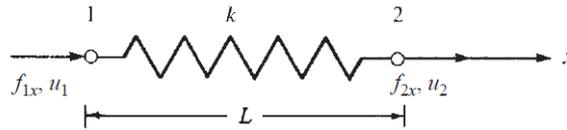


Figura 9.- Elemento de resorte lineal con desplazamiento nodal positivo y convenciones de fuerza. [27]

A continuación, se desarrolla una relación entre las fuerzas y los desplazamientos nodales para un elemento de resorte. Esta relación será la matriz de rigidez. Por lo tanto, queremos relacionar la matriz de fuerza nodal con la matriz de desplazamiento nodal de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} f_{1x} \\ f_{2x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

Resolviendo tenemos:

$$f_{1x} = (k_{11} * d_{1x}) + (k_{12} * d_{2x})$$

$$f_{2x} = (k_{21} * d_{1x}) + (k_{22} * d_{2x})$$

Donde k figura el coeficiente de permeabilidad del material. Este método de análisis posee múltiples aplicaciones, ya sea para sistemas estructurales o no estructurales. [27]

1.1.4.8. El Metamodelo

La mayoría de análisis realizados en ingeniería requieren de grandes costos computacionales y tiempo excesivo para su análisis. Esto conlleva a buscar un modelo aproximado, conocido como metamodelo. Se podría definir como un modelo del modelo con un enfoque básico de construir aproximaciones garantizando que el análisis sea más eficiente y su rendimiento sea óptimo. El objetivo de la aplicación de un metamodelo para la simulación consiste en evaluar el comportamiento de un elemento o sistema con el menor coste computacional posible. [30]

La definición de forma matemática se puede reducir:

El análisis original o modelo, representado con la ecuación:

$$y = f(x) \tag{7}$$

El modelo del modelo o metamodelo, se representa:

$$\hat{y} = g(x) \tag{8}$$

Entonces:

$$y = \hat{y} + \varepsilon$$

Donde:

y = modelo real

\hat{y} = metamodelo

ε = error de las mediciones

El metamodelado es comúnmente aprovechado en la aplicación de diseño de experimentos, con el fin de identificar la eficiencia de ejecución del análisis. [30]

A lo largo de los años, ha quedado claro que el metamodelado proporciona una función de soporte de decisiones para los ingenieros de diseño. A continuación, se enumeran algunas de las áreas en las que el metamodelo puede desempeñar un papel.

- Modelo de aproximación. La aproximación de los procesos de computación intensiva en todo el espacio de diseño, o la aproximación global, se utiliza para reducir los costos de computación.
- Diseño de la exploración espacial. Se explora el espacio de diseño para mejorar la comprensión de los ingenieros sobre el problema del diseño al trabajar en un metamodelo de bajo costo.
- Formulación del problema. Sobre la base de una mejor comprensión de un problema de optimización del diseño; ciertas restricciones ineficaces pueden ser eliminadas; un solo problema de optimización de objetivos puede cambiarse a un problema de optimización de objetivos múltiples o viceversa. El metamodelo puede ayudar a la formulación de un problema de optimización que es más fácil de resolver o más preciso que otro.
- Soporte de optimización. La industria tiene varias necesidades de optimización. Cada tipo de optimización tiene sus propios retos. El metamodelado se puede aplicar e integrar para resolver varios tipos de problemas de optimización que involucran funciones de computación intensiva. [31]

Aplicación al diseño ingenieril

El metamodelado permite crear aproximaciones de análisis computacionales ya existentes y a su vez generar modelos de análisis que sean más rápidos y con una mayor eficiencia.

Esto permite al diseñador mejorar u optimizar las soluciones como variables del diseño. En conclusión, un metamodelo es de gran utilidad esencialmente en las últimas etapas de diseño, cuando ya existe información detallada de las soluciones y se requiere de un análisis de precisión. Sin embargo, en etapas tempranas la información es incierta por lo que su enfoque apunta a mejorar la configuración.

La aplicación de un metamodelo facilita un análisis rápido y de menor costo computacional, totalmente equilibrado entre exactitud y eficiencia. [30]

1.1.5. Hipótesis

El análisis de modelos geométricos para estructuras de telecomunicaciones tipo monopolo permitirá obtener una mayor eficiencia y desempeño en las conexiones apernadas tipo brida.

1.1.5.1. Variable independiente

Modelos geométricos para estructuras de telecomunicaciones tipo monopolo.

1.1.5.2. Variable dependiente

Comportamiento de las conexiones apernadas tipo brida en estructuras de telecomunicaciones tipo monopolo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento a flexión de conexiones apernadas tipo brida para la unión de tubos facetados en estructuras metálicas tipo monopolo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las características funcionales de las conexiones apernadas tipo brida utilizados para la unión de tubos facetados mediante revisión bibliográfica y medición en campo.

Para determinar las características funcionales de las conexiones apernadas tipo brida utilizados para la unión de tubos facetados se realizará una revisión teórica-técnica, haciendo uso de recursos bibliográficos y mediciones en campo.

- Analizar el comportamiento mecánico de las conexiones apernadas tipo brida para tubos facetados utilizados en la actualidad, mediante el análisis por elementos finitos aplicando criterios de falla.

El análisis del comportamiento de las conexiones apernadas tipo brida instaladas en estructuras de telecomunicaciones se realizará únicamente a flexión considerando los parámetros de diseño referentes a dimensiones, materiales, cargas y condiciones de servicio, generando un modelo tridimensional que permita evaluar los desplazamientos y estados tensionales presentes en las juntas apernadas mediante la utilización de un software de elementos finitos.

- Diseñar una estructura tipo monopolo mediante conexiones apernadas tipo brida de tubos facetados optimizando las conexiones estudiadas mediante un metamodelo de simulación.

El diseño de una estructura tipo monopolo mediante conexiones apernadas tipo brida de tubos facetados involucra la simplificación del modelo de análisis por elementos finitos, permitiendo el diseño de un metamodelo que simulen las condiciones de mayor sollicitación. La comprensión del metamodelo implica la optimización de los aspectos que intervienen en el dimensionamiento, montaje y funcionamiento de un monopolo, mejorando su desempeño y prolongando su vida útil.

- Validar los resultados del diseño mediante ensayo físico de un prototipo a escala aplicando estados de carga de viento.

Para la validación de resultados es necesario la utilización de un prototipo que permita comparar y discutir los resultados antes obtenidos de los ensayos físicos con los resultados numéricos de las simulaciones y del modelo matemático, permitiendo acertar la metodología utilizada y determinar la desviación de resultados.

CAPITULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Constituyen un conjunto de elementos necesarios para la realización de actividades o tareas específicas como la medición de fuerzas, desplazamientos y deformaciones, resultado de ensayos aplicados a la estructura tipo monopolo a diferentes condiciones de servicio, orientado a entender su comportamiento.

2.1.1. Galgas de espesores

Las galgas de espesores es una herramienta básica, Figura 10. Son utilizadas en el mantenimiento de las máquinas con necesidad de ajustar con precisión distancias entre elementos. Sirven para dar un margen de separación entre elementos que encajan entre sí o ajustar con precisión la distancia entre dos elementos. Es por ello que en la presente investigación se las utiliza para medir la apertura existente entre las bridas al momento de aplicarle una carga.



Figura 10.- Galga de espesores

2.1.2. Balanza

Balanza eléctrica colgante de 500 kg marca Jontex, Figura 11. Permite la medición de la fuerza aplicada a la estructura durante la realización del ensayo físico del prototipo; posee las siguientes características:

- Celda de carga de aluminio
- Capacidad máxima de 500 kg
- Tiempo de estabilización de 3s máximo
- Sobrecarga máxima en peso 20% de la capacidad total

- Batería recargable 6V/12AH
- Temperatura de trabajo -10 a 40 grados centígrados



Figura 11.- Balanza o celda de carga

2.1.3. Reloj Comparador

Constituye es un aparato que transforma el movimiento rectilíneo de los palpadores o puntas de contacto en movimiento circular de las agujas, figura 12. La capacidad para detectar la diferencia de medidas es posible gracias a un mecanismo de engranajes y palancas, conectado a un eje que se desliza y mueve la aguja del reloj, haciendo posible la lectura directa y fácil de las diferencias de medida. Para el ensayo realizado en esta investigación, el reloj comparador nos ayuda en la medición de desplazamiento. Se ubica en el extremo superior de la estructura permitiendo identificar los valores de desplazamiento máximo a diferentes estados de carga aplicados.



Figura 12.- Reloj comparador

2.1.4. Torquímetro

Herramienta que se emplea para el ajuste de bulones, tuercas, tornillos y otras piezas, figura 13. Son conocidos como llaves de torsión o llaves dinamométricas, se utilizan en motores de combustión, equipamientos que permiten el manejo de gases y líquidos, tuberías de tipo industrial y otros dispositivos. Permite la aplicación de una tensión específica: por eso se caracteriza por su precisión. En nuestro enfoque, el torquímetro permite la aplicación de la pretensión a los pernos de unión entre la junta bridada de las secciones que constituyen la estructura, asegurándonos de esta manera de no exceder del valor específico requerido en cada perno.



Figura 13.- Torquímetro

2.2. Métodos

La metodología utilizada en este trabajo experimental consta de varias etapas dependientes entre sí, por tanto, es importante la ejecución de las mismas de manera continua. Se clasifica según las actividades realizadas en el trabajo:

Estudios preliminares

La recopilación de información de las características funcionales y de servicio a las que se encuentran expuestas las conexiones apernadas tipo brida utilizadas para la unión de tubos facetados en estructuras tipo monopolo será mediante una revisión teórica-técnica, haciendo uso de recursos bibliográficos y mediciones en campo.

Modelos de análisis

Las conexiones apernadas tipo brida instaladas en estructuras de telecomunicaciones serán analizadas a flexión considerando los parámetros de diseño referentes a dimensiones, materiales, cargas y condiciones de servicio, generando un modelo tridimensional que permita simular las condiciones antes descritas mediante la utilización de un software de elementos finitos, evaluando desplazamientos y estados tensionales presentes en las juntas apernadas.

Simplificación del modelo

El diseño de una estructura tipo monopolo mediante conexiones apernadas tipo brida de tubos facetados involucra la simplificación del modelo de análisis por elementos finitos, permitiendo el diseño de un metamodelo que simulen las condiciones de mayor sollicitación y su simplificación mediante un prototipo a escala.

Modelo matemático

El modelo matemático involucra la obtención de ecuaciones mediante hipótesis basadas en su comportamiento estático estructural, que permita de reproducir los desplazamientos la estructura tipo monopolo obteniendo resultados óptimos y reduciendo el tiempo de análisis.

Análisis de resultados

Comparar y discutir los resultandos obtenidos de los ensayos físicos realizados en el banco de pruebas con los resultados numéricos de las simulaciones y del modelo matemático, permitiendo la validación de la metodología utilizada y determinado la desviación de resultados.

2.2.1. Tipo de investigación

Bibliográfico

El estudio elaborado es de tipo bibliográfico debido a que se realiza una recopilación de información de varias fuentes bibliográficas con el propósito de obtener parámetros de servicio, conceptos de funcionamiento y recomendaciones ventajosas que permitan desarrollar el tema expuesto.

Descriptivo

El estudio es de tipo descriptivo ya que se describe el proceso de análisis y diseño de las juntas apernadas en estructuras tipo monopolo mediante el método de elementos finitos, además se menciona el proceso de ensayo experimental del modelo simplificado que permitirá la validación del caso de estudio.

Experimental

La investigación es de tipo experimental debido a que se realizará la optimización y ensayo de diferentes modelos digitales, que permitan obtener parámetros y variables apropiados para la simulación de los estados de carga y resistencia de juntas apernadas en estructuras tipo monopolo que generen resultados válidos.

Correlacional

La investigación correlaciona el modelo matemático propuesto con el ensayo experimental y el análisis por elementos finitos, mediante el análisis del porcentaje de error alcanzado comparando con los datos del modelo de análisis real de la estructura.

2.2.2. Plan de recolección de la información

La recolección de información se realizará principalmente de fuentes bibliográficas referentes al tema, como son normas, libros, artículos técnicos, trabajos de investigación y sitios web que ayuden a la comprensión de conceptos y parámetros necesarios en este trabajo de investigación. Además, otro medio de recolección de información será toda aquella obtenida por medio de los investigadores de forma directa.

El plan de recolección de la información se enfoca directamente en conseguir resultados a partir de simulaciones realizadas aplicando el método de elementos finitos que brinden las referencias necesarias, para evaluar y comparar con un modelo optimizado. Para ello, se necesita de la información relacionadas al tópico de método de elementos finitos y metamodelado. Por otro lado, se recurrirá también al método de observación directa para registrar y sistematizar el comportamiento de la estructura ante escenarios visibles mediante los ensayos físicos.

La información obtenida servirá como soporte para comprender el comportamiento del sistema que se va a simplificar, además adquirir las bases del conocimiento para plantear el modelo matemático que asegure los resultados deseados. Los datos obtenidos mediante la observación se registrarán para su posterior análisis y comparación entre los datos generados del modelo original de investigación y el modelo optimizado de simulación.

2.2.3. Recolección de la información preliminar

En esta fase se describen detalladamente todos los datos y parámetros iniciales que se deben tener a consideración para la correcta ejecución de este trabajo de investigación.

2.2.3.1. Descripción de la estructura

Una estructura tipo monopolo consta de secciones tubulares o polinomiales de diámetros variables de acuerdo a condiciones de carga y/o especificaciones que el cliente requiere, figura 14. Cada sección se une mediante juntas bridadas que se complementan con la utilización de pernos de alta resistencia para su montaje.



Figura 14.- Estructura tipo monopolo de secciones poligonales [18]

2.2.3.2. Anclaje o soporte de la estructura

La estructura se sujeta al piso mediante pernos de anclaje fundidos en el bloque de cimentación, con sus respectivas tuercas de nivelación, como se muestra en la figura 15.

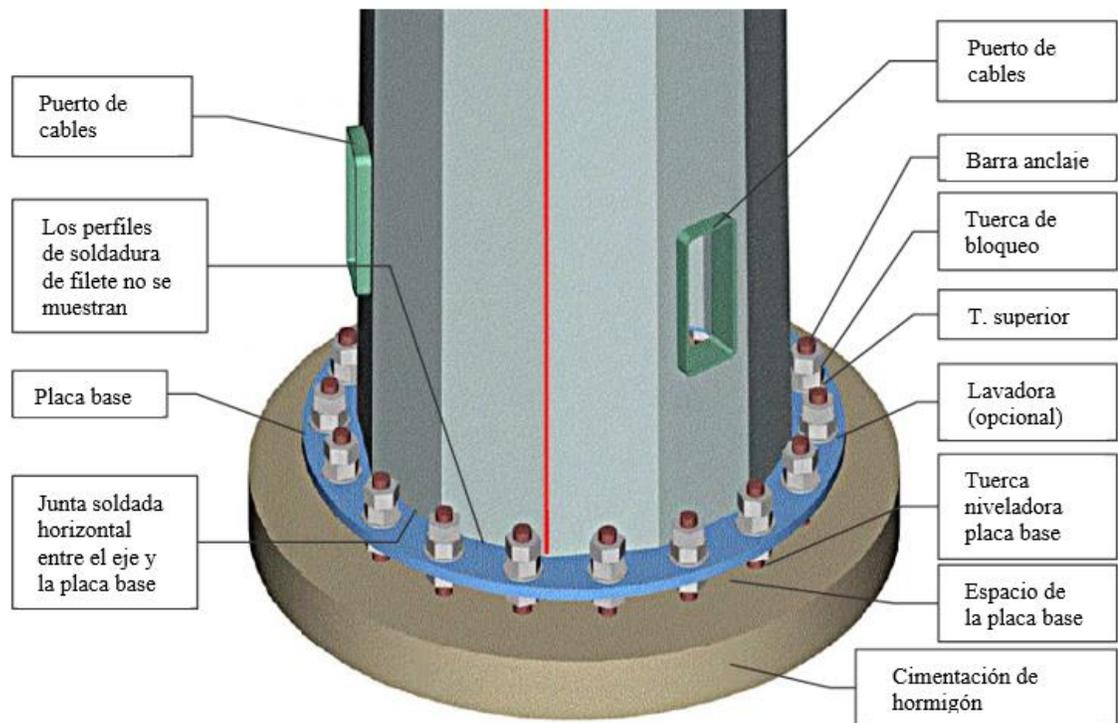


Figura 15.- Configuración del anclaje al piso de la estructura tipo monopolo [4]

2.2.3.3. Identificación de materiales

Las secciones de la estructura están fabricadas con acero ASTM A36 o acero ASTM A500 Grado A, sin embargo, los pernos de unión utilizados para las juntas bridadas son de tipo ASTM A325, con sus propiedades y dimensiones especificadas en su ficha técnica.

Acero estructural ASTM A 500 grado A

Utilizado en estructuras, se caracteriza por ser un material elasto-plástico con propiedades muy similares al ASTM A36. En la tabla 1 se muestra sus propiedades correspondientes:

Tabla 1.- Propiedades acero estructural ASTM A500

Propiedad	Valor
Densidad	7890 kg/m ³
Módulo de Young	200000 MPa
Esfuerzo a la fluencia mínima	320 MPa
Esfuerzo a la Tensión	430 MPa
Relación de Poisson	0.3
Deformación plástica de rotura	0.37

Fuente: [Autores]

Acero estructural ASTM A 36

Material elasto-plástico muy utilizado en elementos estructurales. En la tabla 2 se muestra sus propiedades respectivas:

Tabla 2.- Propiedades acero estructural ASTM A36

Propiedad	Valor
Densidad	7890 kg/m ³
Módulo de Young	200000 MPa
Esfuerzo a la fluencia mínima	250 MPa
Esfuerzo a la Tensión	400 – 550 MPa
Relación de Poisson	0.3
Deformación plástica de rotura	0.283

Fuente: [Autores]

Perno tipo A325

Poseen una alta resistencia a la fluencia y a la tensión, tabla 3. Están compuestos de acero con contenido medio en carbono, tratados en caliente, y su fuerza de pretensión depende directamente del diámetro del mismo, tabla 4. Los pernos de alta resistencia presentan diámetros entre ½ in a 1½ in. Los diámetros más utilizados en edificaciones son ¾ in y 7/8 in, por otro lado, los tamaños más frecuentes en diseño son 7/8 in y 1 in.

Tabla 3.- Propiedades pernos A325

Propiedad	Valor
Esfuerzo a la fluencia mínima	586 MPa
Esfuerzo a la Tensión	827 MPa

Fuente: [Autores]

Tabla 4.- Pretensión mínima de pernos A325

Tamaño de Perno (in)	Pretensión Min (ton)
1/2	5.44
3/4	12.70
7/8	17.69
1	23.13
1 1/8	25.4.
1 1/4	32.21

Fuente: [Autores]

2.2.3.4. Fuerzas de viento

Las estructuras tipo monopolo son eficientes a alturas menores a 48 metros. Son ligeras, por lo que en su diseño influye mucho los esfuerzos que genera el viento. Debido a su peso relativamente bajo, los sismos o movimientos telúricos no afectan significativamente en este tipo de estructuras.

En el Ecuador, la velocidad de viento está definida por el Mapa de Isotacas (ANEXO 3), generado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología; las velocidades de viento máximas se registran en la tabla 5. La velocidad máxima del viento en el Ecuador presenta un valor de 20.33 m/s en un ambiente que relacionan las categorías de exposición y topográficas que describen su comportamiento a una altura superior a los 10 m.

Tabla 5.- Velocidades de viento máximas en Ecuador

Código	Estación	Altura	Velocidad de Viento	
		[m]	[m/s]	[km/h]
M0001	Inguincho	3140	17,33	62,39
M0002	La Tola	2480	18,17	65,41
M0029	Baños	1695	20,00	72,00
M0031	Cañar	3083	16,50	59,40
M0033	La Argelia-Loja	2160	16,83	60,59
M0102	El Ángel	3000	20,00	72,00
M0141	El Labrado	3335	17,58	63,29
M0142	Saraguro	2525	17,50	63,00
M0143	Malacatos	1453	17,92	64,51
M0145	Quinara Inamhi	1559	18,50	66,60
M0147	Yangana	1835	20,33	73,19
M0148	Célica	1904	19,33	69,59
M0258	Querochaca (UTA)	2865	19,67	70,81

Fuente: [Autores]

2.2.4. Plan de procesamiento y análisis

Recolección, procesamiento y análisis de la información se procederá:

- Revisión de información, reglamentos y normas asociadas al tema de estudio.
- Creación de un modelo digital para la estructura analizada.

- Análisis mediante elementos finitos del modelo digital.
- Modelado de un diseño simplificado como caso de estudio.
- Análisis mediante elementos finitos del modelo simplificado
- Validación del modelo simplificado mediante prototipo.
- Obtención de aproximaciones para la generación de un modelo matemático.
- Planteamiento y desarrollo del modelo matemático.
- Verificación y comparación de resultados obtenidos.

CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

Dentro de este capítulo se aborda los resultados de la presente investigación, mediante la identificación de las características funcionales y el análisis del comportamiento de las conexiones apernadas, que permitan optimizar el diseño de una estructura tipo monopolo.

3.1.1. Descripción del modelo evaluado

La configuración del monopolo consta de elementos metálicos, de secciones poligonales con bridas circulares en los extremos de cada sección que facilitan el montaje, mediante pernos de alta resistencia. Para aumentar la resistencia de la conexión entre las bridas circulares y la sección poligonal se utilizan cartelas de refuerzo, como se muestra en la figura 16.



Figura 16.- Cartelas de refuerzo utilizadas en estructuras tipo monopolo [4]

Las secciones son previamente construidas en taller mediante proceso de fabricación en base a las condiciones de diseño y montaje que garantizan su correcto desempeño.

El montaje se realiza en campo a través de una secuencia de atornillado que permite la conexión de las secciones hasta obtener la estructura final.

3.1.1.1. Características de fabricación y montaje

- Las bridas están unidas a las secciones poligonales mediante soldadura.
- Las cartelas de refuerzo están unidas a las secciones poligonales y a sus respectivas bridas mediante soldadura.
- Las secciones bridadas se unen mediante pernos de alta resistencia, con su pretensión específica.

- La estructura se sujeta al piso mediante pernos de anclaje fundidos en el bloque de cimentación, con sus respectivas tuercas de nivelación.

3.1.1.2. Condiciones de servicio

Las torres tipo monopolo son estructuras con gran aceptación, especialmente para ser utilizadas en zonas urbanas, con el objetivo de minimizar la contaminación visual.

Una torre tipo monopolo dependiendo del lugar de ubicación, está expuesta a diversas condiciones de carga vivas y/o muertas, que en conjunto a las condiciones ambientales presentes en el lugar alteran de una u otra manera su comportamiento. De estos factores depende esencialmente el diseño de la estructura, la selección del material de fabricación, el proceso la construcción y el proceso ensamble propuesto para su instalación.

Algunas de las consideraciones para el diseño se enfocan esencialmente en los materiales. Los aceros estructurales más comunes utilizados para la construcción de este tipo de estructuras en Ecuador son el acero ASTM A-36 y el ASTM A572. Por otro lado, los pernos de unión son de alta resistencia, de tipo ASTM A-325 y ASTM A394-T1. Los elementos que conforman la estructura deben ser galvanizados según las especificaciones establecidas en las normas ASTM A123 y ASTM A-153 respectivamente.

La estructura está expuesta a cargas permanentes como el peso propio y de sus accesorios, cargas sísmicas y especialmente cargas producidas por el viento. En el Ecuador, la velocidad básica de viento está definida por el Mapa de Isotacas, generado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en el estudio realizado desde el año 1981 hasta el año 2010, basado en los procedimientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial. La velocidad máxima del viento en el Ecuador presenta un valor de 20.33 m/s (73.19 km/h) acorde a las categorías de exposición y topográficas que describen dicho comportamiento a una altura superior a los 10 m.

Los elementos de unión entre bridas son pernos A325, que presentan una mayor resistencia mecánica garantizando una mejor conexión entre las juntas. Debido a la pretensión que genera la carga axial entre las juntas se originan estados de corte en el perno, deslizamiento crítico y aplastamiento entre las bridas. La precarga depende principalmente del tipo y la dimensión del elemento de unión. Ante esto existe un

concepto erróneo de que los pernos SAE Grado 5 y 8 pueden suplir a los pernos antes mencionados.

Un perno SAE es diseñado específicamente para la industria automotriz y no presenta el mismo comportamiento ante un ámbito estructural, originando micro fisuras una vez sometido a un proceso de galvanización [32]. Otra desventaja es que carecen de manganeso, propiedad capaz de desoxidar e incrementar el endurecimiento sin que el acero se torne frágil. También, se puede diferenciar claramente una diferencia en sus dimensiones.

Un perno de alta resistencia tipo A325 consta básicamente del perno (1), arandela plana (2), arandela de presión (3) y su respectiva tuerca (4), figura 17:

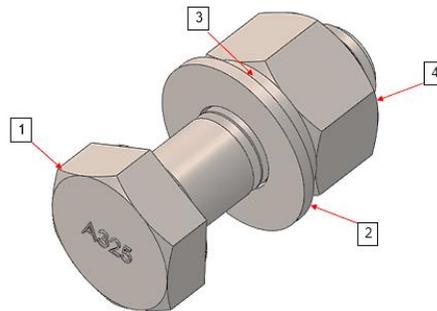


Figura 17.- Elementos de un perno A325

De manera general, en el Ecuador no existe un reglamento o norma específico que estandarice las especificaciones para el diseño de torres de telecomunicaciones. Sin embargo, la norma ANSI TIA 222 es utilizada como referencia debido a su gran relación teórica que presenta. La edición actual de la norma es la ANSI TIA 222-G, que difiere significativamente de su antigua versión, la ANSI TIA 222-F.

Las diferencias presentes en el cambio de edición de la norma han permitido optimizar las estructuras de acuerdo a la zonificación, permitiendo el diseño de estructuras más livianas y optimizando significativamente los recursos económicos. En relación, se debe especificar la velocidad del viento acorde a la zona de ubicación de la estructura. Sin embargo, existe un desconocimiento de los valores de velocidad básica del viento en el país, por lo que la mayoría de compañías dedicadas al diseño y construcción de este tipo de estructuras optan por velocidades entre 120 km/h hasta 140 km/h. Estos valores producen sobredimensionamiento en los elementos de la estructura y por ende un elevado uso de recursos económicos.

3.1.2. Modelo real de análisis

3.1.2.1. Concepción del modelo

Las secciones polinomiales comúnmente utilizadas para el diseño de monopolos son de 8, 12 y 16 lados, parámetro que influye directamente en la rigidez de la sección, conocida como la capacidad de un cuerpo a doblarse o torcerse por acción de fuerzas exteriores. Por lo tanto, a mayor número de lados por sección mayor será la rigidez de la misma. Como caso de estudio para este trabajo se opta por el diseño con secciones más propensas a fallas, secciones con menor rigidez, siendo estas secciones con ocho lados.

El enfoque principal de este trabajo se basa en las acciones que produce el viento sobre las estructuras tipo monopolo. Para ello, se identificó que la fuerza debida a la acción del viento depende de las variables características presentes en el lugar de instalación. Estas variables afectan directamente a la fuerza que ejerce el viento sobre la estructura. De manera general estas son: altura de la estructura, topografía del terreno, dirección del viento, áreas de incidencia, presión dinámica, fator de ráfaga, resistencia aerodinámica, entre otros factores o constantes que inciden en el cálculo.

En base a [21], se debe determina la carga de viento de diseño, misma que depende en su mayoría de la velocidad del viento, la categoría de exposición y la categoría topográfica del lugar de instalación de la torre. Para nuestro trabajo, se asume un caso extremo de velocidad máxima de viento de 25 m/s (90 Km/h). Se opta por una categoría de exposición tipo B, que representa la instalación de la torre en áreas urbanas o suburbanas con números obstáculos. Por otro lado, se opta por una categoría topográfica 2, la cual representa idóneamente el terreno para la ubicación de la estructura sobre una cresta de una escarpa, como se muestra en la figura 18.

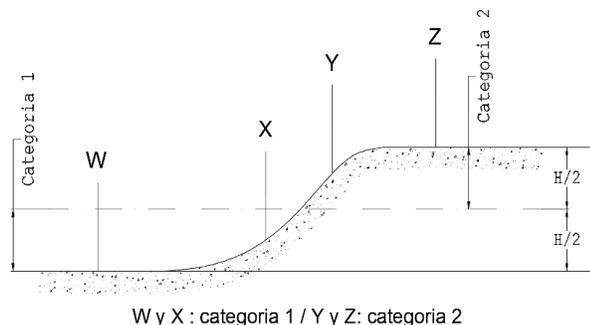


Figura 18.- Ejemplificación de una escarpa [21]

En relación a las zonas urbanas presentes en el Ecuador, las empresas operadoras utilizan en su mayoría monopolos de seis secciones o menos. Por ello, se opta por analizar una estructura de seis secciones debido a que tendrá mayor exposición a los diversos factores físicos y ambientales que influyen en su comportamiento.

La carga de viento de diseño depende esencialmente de la altura del monopolo. Las alturas comunes para monopolos van desde 12 metros a 36 metros de altura. Como ejemplo de cálculo de la carga de viento, se utiliza un monopolo de seis secciones. Las consideraciones iniciales para el cálculo se muestran en la tabla 6, y las dimensiones generales de las secciones polinomiales se detallan en el ANEXO 4.

Tabla 6.- Consideraciones iniciales para el cálculo de la carga de viento

SECCION	Altura de sección [m]	Velocidad de viento [km/h]	Sección Octógono	
			Dimensión [mm]	Ancho de Cara [mm]
Sección-01	36	90	φ600x6	230
Sección-02	30	90	φ600x8	230
Sección-03	24	90	φ700x8	268
Sección-04	18	90	φ800x10	306
Sección-05	12	90	φ900x10	345
Sección-06	6	90	φ1000x12	383

Fuente: [Autores]

Tomando en cuenta todas las consideraciones antes mencionadas orientadas a un diseño conservador y siguiendo el proceso de cálculo propuesto en [21], nos permite obtener los valores de fuerza de viento de diseño sobre la estructura por cada tramo o sección, como se resume en la tabla 7:

Tabla 7.- Fuerza de viento actuante en cada tramo o sección del monopolo

SECCION	Coefficiente de presión dinámica Kz	Factor topográfico Kzt	Factor de ráfaga GH	Coefficiente de velocidad C	Coefficiente de fuerza CF	Presión Dinámica qz (kg/m ²)	Ancho de incidencia [m]	Fuerza Total por tramo [Kg/m]
Sección-01	1,011	1,101	1,10	16,97	1,2	47,52	0,6	37,64
Sección-02	0,954	1,148	1,10	16,84	1,2	46,81	0,6	37,07
Sección-03	0,888	1,219	1,10	19,53	1,2	46,25	0,7	42,74
Sección-04	0,807	1,326	1,10	22,19	1,2	45,70	0,8	48,26
Sección-05	0,700	1,490	1,10	24,64	1,2	44,54	0,9	52,91
Sección-06	0,700	1,745	1,10	29,63	1,2	52,16	1,0	68,85

Fuente: [Autores]

Con el objetivo de simplificar los estados de carga y validar el comportamiento de la estructura mediante ensayo físico transformaremos las cargas distribuidas de viento a cargas puntuales equivalentes, aplicando principios de estática y resistencia de materiales, que permiten obtener efectos mecánicos similares. En nuestro modelo, la fuerza equivalente se determina por cada sección, mediante el producto de la fuerza distribuida por la longitud respectiva. Además, se calculó los momentos producidos por cada fuerza equivalente respecto a la base de la estructura, como se observa en la tabla 8.

Tabla 8.- Fuerzas y momentos en cada sección del monopolo

SECCION	Fuerza Total por tramo [Kg/m]	Fuerza total puntual por sección [Kg]	Momentos por sección [Kg*m]
Sección-01	37,64	225,82	7452,09
Sección-02	37,07	222,43	6005,73
Sección-03	42,74	256,43	5385,08
Sección-04	48,26	289,54	4343,18
Sección-05	52,91	317,45	2857,09
Sección-06	68,85	413,10	1239,30
TOTAL		1724,79	27282,47

Fuente: [Autores]

Partiendo del momento total obtenido, determinamos una fuerza puntual equivalente de 649.58 Kg (6372.40 N) ubicada en el extremo superior de la estructura, que produce efectos mecánicos similares a la carga del viento total sobre el monopolo.

Por otro lado, la fuerza de viento de diseño sobre los accesorios es también de relevancia. Sin embargo, en ausencia de datos más precisos acerca del número, dimensiones y soporte de las antenas, se deberá determinar usando el Anexo C propuesto en [21], obteniendo un valor de carga de 339.78 Kg (3333.21 N).

3.1.2.2. Análisis mediante elementos finitos del modelo real

Conocidos los parámetros iniciales, procedemos a analizar el monopolo en relación a su altura mediante software de elementos finitos.

El análisis mediante elementos finitos permitirá entender el comportamiento y modo de colapso de la estructura, por ello se debe tomar en cuenta todas las características y condiciones importantes que influyen en el monopolo permitiendo obtener resultados óptimos.

Para el desarrollo del análisis se aplicará una fuerza equivalente dependiendo del número de secciones y/o altura del monopolo (10000 N para seis secciones, Figura 19) en la parte superior de la estructura, que simula de manera puntual la carga lateral que ejerce el viento.

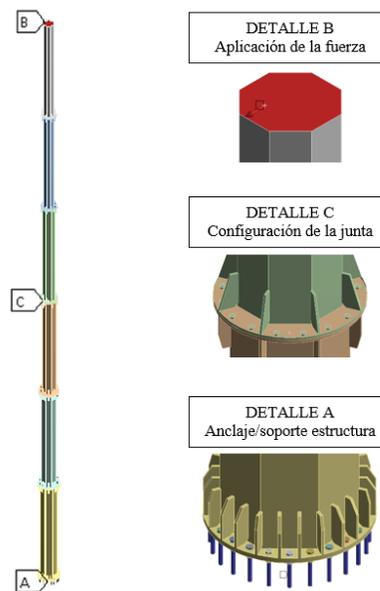


Figura 19.- Configuración de análisis MEF para monopolo de seis secciones [Autores]

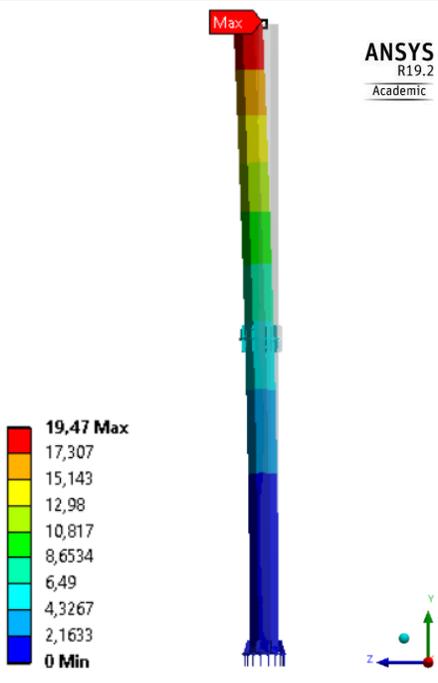
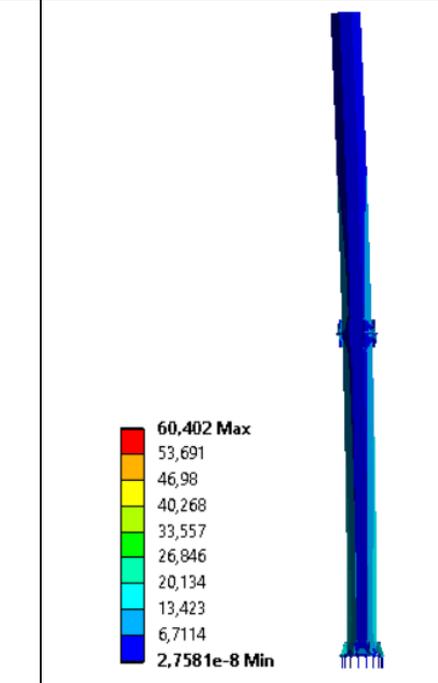
La simulación es estática, donde se reemplazó los pernos de unión entre bridas por conexiones tipo “beam” que representan adecuadamente el comportamiento de un perno de unión. La conexión entre bridas se simula mediante la utilización de un contacto tipo “Frictionless” que permite la separación entre placas y su respectivo deslizamiento.

Para una mejor aproximación en los resultados se realiza un refinamiento del mallado en las juntas de unión de la estructura.

A continuación, se simula cinco casos de estudio, con el objeto de identificar el caso más crítico para su respectivo análisis específico.

3.1.2.2.1. Simulación 1

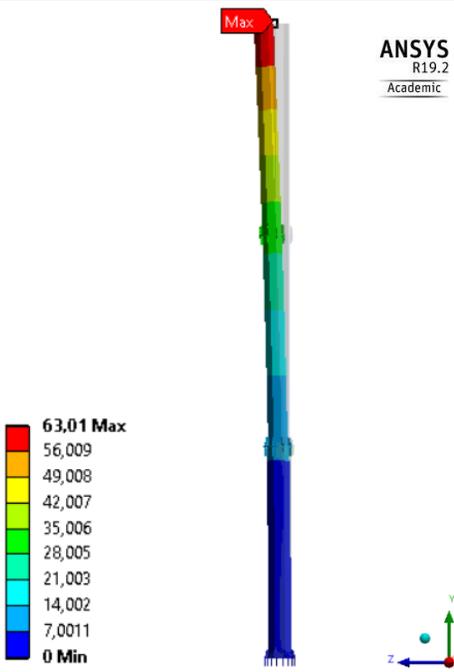
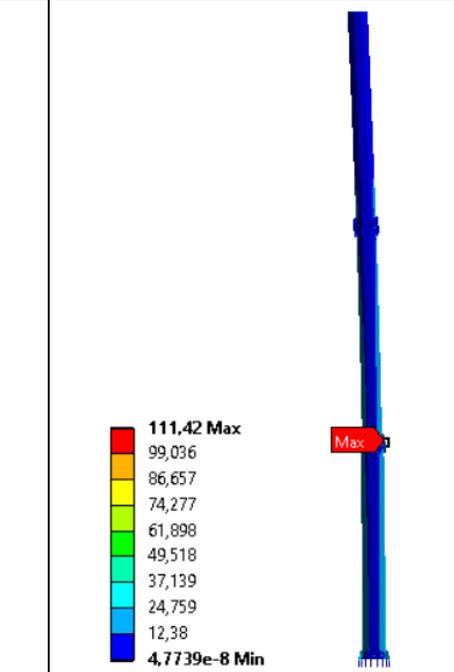
Tabla 9.- Análisis de resultados de la simulación 1

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MEF-01	Monopolo:	Dos secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	3500 N	Octógono	48 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	122414	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	69239	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Deformación Máxima		Esfuerzos de Von Misses	
 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>19,47 Max</p> <p>17,307</p> <p>15,143</p> <p>12,98</p> <p>10,817</p> <p>8,6534</p> <p>6,49</p> <p>4,3267</p> <p>2,1633</p> <p>0 Min</p>		 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>60,402 Max</p> <p>53,691</p> <p>46,98</p> <p>40,268</p> <p>33,557</p> <p>26,846</p> <p>20,134</p> <p>13,423</p> <p>6,7114</p> <p>2,7581e-8 Min</p>	
<p>El monopolo de dos secciones o 12 m presenta una deformacion máxima es de 19.47 mm y su esfuerzo máximo es de 60.4 MPa</p>			

Fuente: [Autores]

3.1.2.2.2. Simulación 2

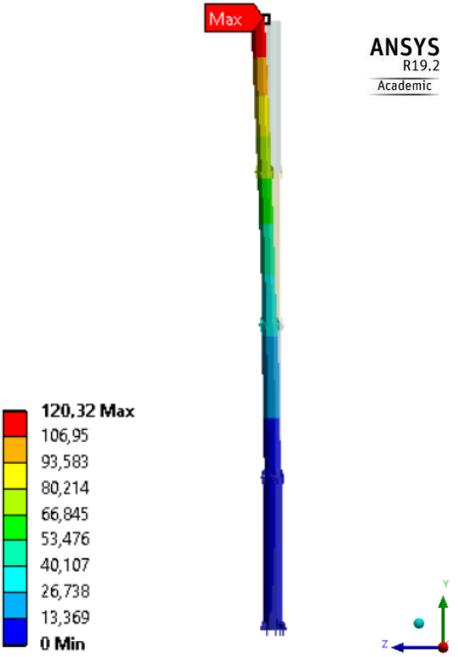
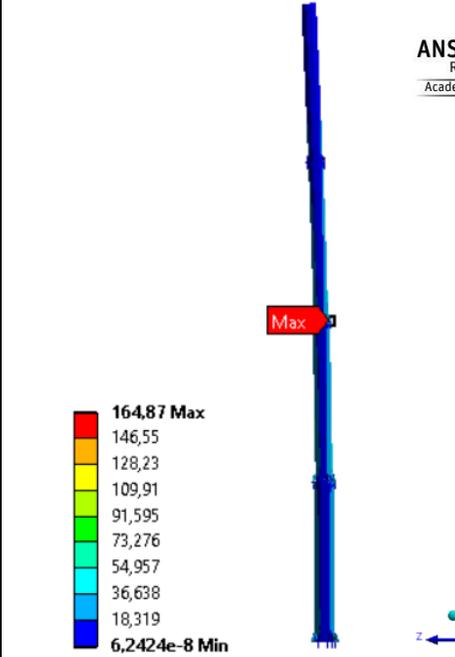
Tabla 10.- Análisis de resultados de la simulación 4

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 			
N° de Simulación:	MEF-02	Monopolo:	Tres secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	4600 N	Octógono	87 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	208546	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	120081	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Deformación Máxima		Esfuerzos de Von Misses	
 <p>63,01 Max</p> <p>56,009 49,008 42,007 35,006 28,005 21,003 14,002 7,0011 0 Min</p>		 <p>111,42 Max</p> <p>99,036 86,657 74,277 61,898 49,518 37,139 24,759 12,38 4,7739e-8 Min</p>	
<p>El monopolo de tres secciones o 18 m presenta una deformacion máxima es de 63.01 mm y su esfuerzo máximo es de 111.42 MPa</p>			

Fuente: [Autores]

3.1.2.2.3. Simulación 3

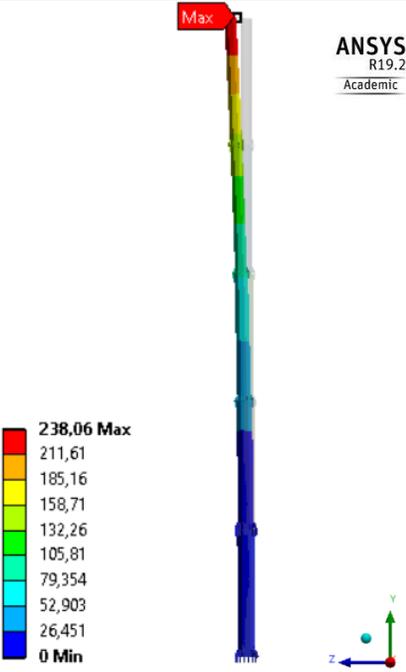
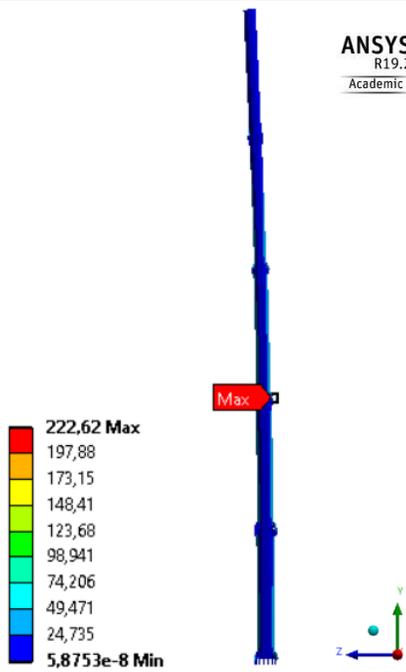
Tabla 11.- Análisis de resultados de la simulación 3

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 			
N° de Simulación:	MEF-03	Monopolo:	Cuatro secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	5500 N	Octógono	124 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	300785	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	174762	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Deformación Máxima		Esfuerzos de Von Misses	
			
<p>El monopolo de cuatro secciones o 24 m presenta una deformacion máxima es de 120.32 mm y su esfuerzo máximo es de 164.87 MPa</p>			

Fuente: [Autores]

3.1.2.2.4. Simulación 4

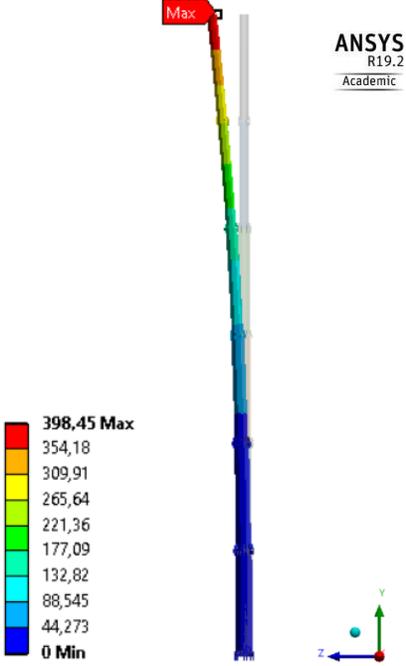
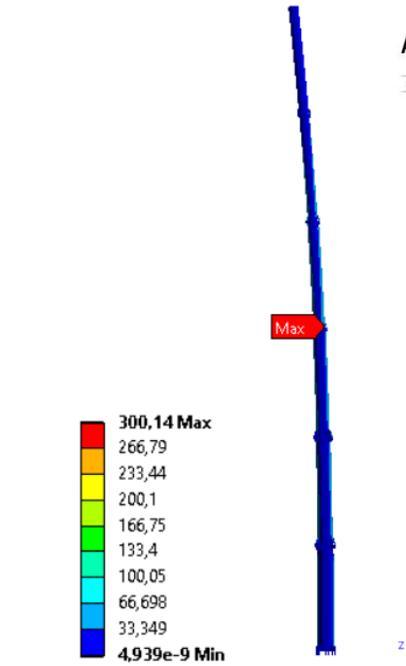
Tabla 12.- Análisis de resultados de la simulación 4

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 			
N° de Simulación:	MEF-04	Monopolo:	Cinco secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	7500 N	Octógono	186 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	392952	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	228910	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Deformación Máxima		Esfuerzos de Von Misses	
			
<p>El monopolo de cinco secciones o 30 m presenta una deformación máxima es de 238.06 mm y su esfuerzo máximo es de 222.62 MPa</p>			

Fuente: [Autores]

3.1.2.2.5. Simulación 5

Tabla 13.- Análisis de resultados de la simulación 5

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA </div> 			
N° de Simulación:	MEF-05	Monopolo:	Seis secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	10000 N	Octógono	248 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	506237	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	296093	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Deformación Máxima		Esfuerzos de Von Misses	
			
<p>El monopolo de seis secciones o 36 m presenta una deformación máxima es de 398.45 mm y su esfuerzo máximo es de 300.14 MPa</p>			

Fuente: [Autores]

Al relacionar el número de secciones y/o altura con el desplazamiento y el esfuerzo, de manera general se obtiene los resultados mostrados en la tabla 14:

Tabla 14.- Relación de desplazamiento y esfuerzos en función de la altura o número de secciones del monopolo

N° Secciones	Altura [m]	Desplazamiento eje Z [mm]	Esfuerzo de Von Misses [MPa]
2 secciones	12	19,47	60,4
3 secciones	18	63,01	111,42
4 secciones	24	120,32	164,87
5 secciones	30	238,06	222,62
6 secciones	36	398,45	300,14

Fuente: [Autores]

A continuación, en la figura 20 se muestra de manera gráfica el comportamiento del desplazamiento en relación a la altura, resultando valores con una tendencia creciente, es decir, a mayor altura mayor será la deformación de la estructura.

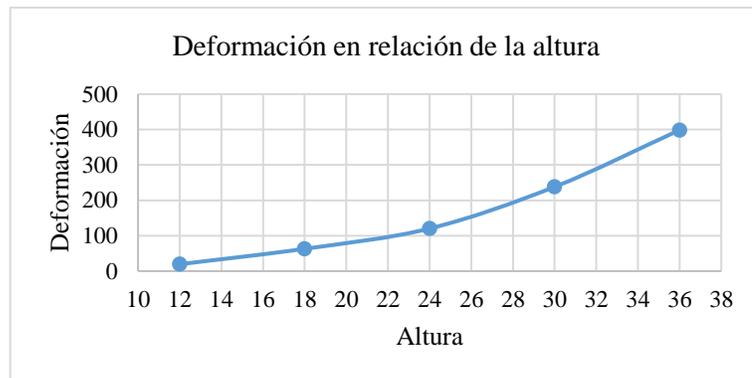


Figura 20.- Comportamiento de la deformación en relación a la altura del monopolo [Autores]

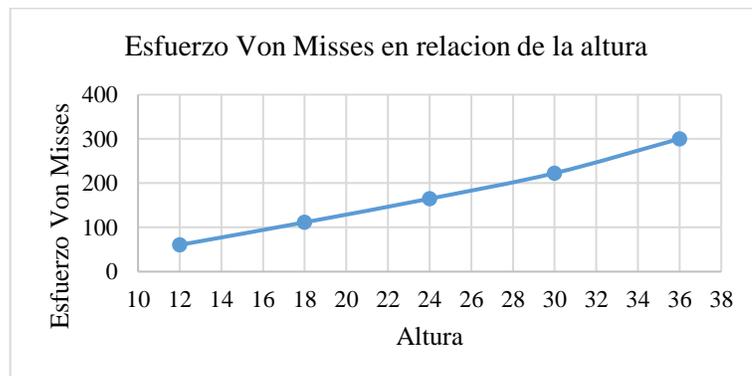


Figura 21.- Comportamiento del esfuerzo en relación a la altura del monopolo [Autores]

En la figura 21 se muestra que, el comportamiento de los esfuerzos en relación a la altura es creciente, obteniendo valores de esfuerzo mayores en estructuras más altas.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, el enfoque de este trabajo se realizará sobre un monopolo de seis secciones con la configuración mostrada en la figura 22, debido a que es la estructura de mayor altura comúnmente usada y está expuesta a condiciones ambientales más severas. En la tabla 15 se presenta el resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos.

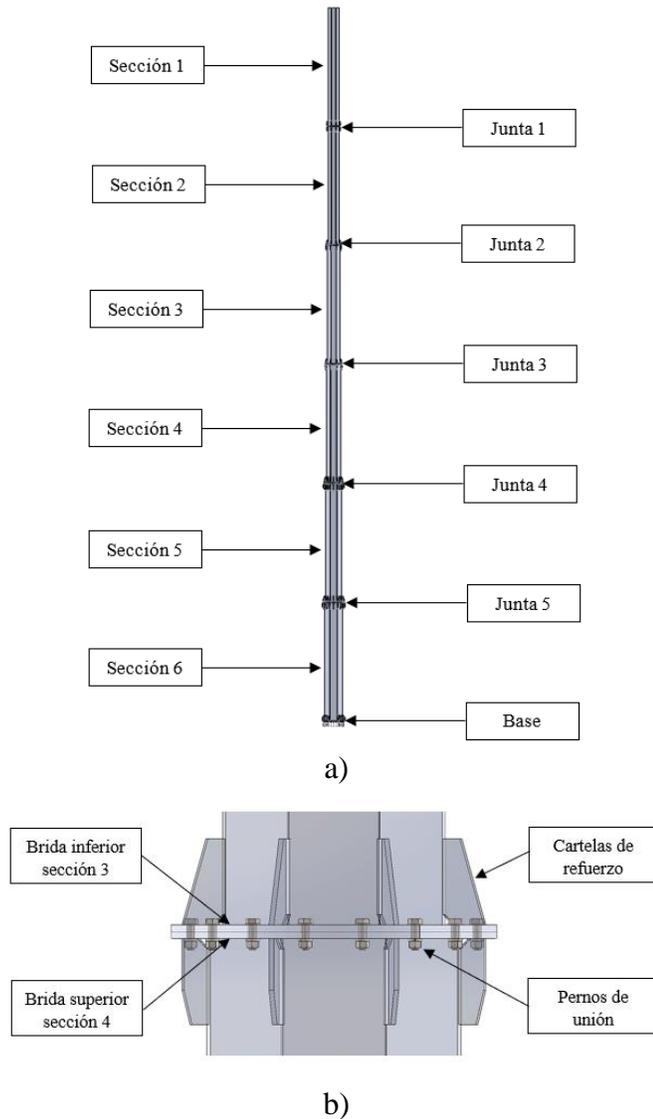
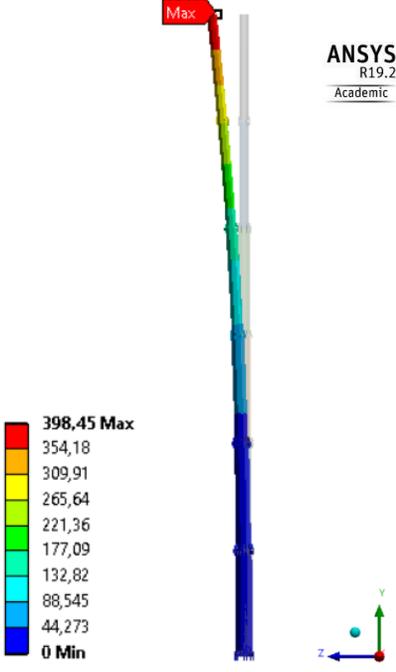
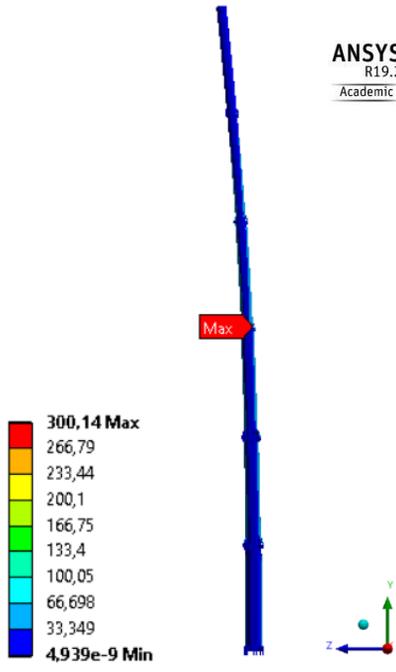


Figura 22.- Monopolo de seis secciones a) Configuración general, b) Configuración de la junta bridada 3 [Autores]

A continuación, en la tabla 15 y tabla 16 se procede a resumir el análisis por elementos finitos con elementos sólidos y elementos tipo shell respectivamente:

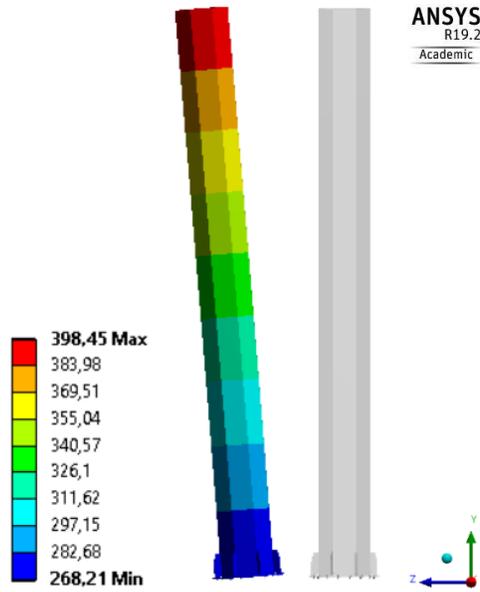
3.1.2.2.6. Simulación 6

Tabla 15.- Análisis de resultados de la simulación 6, monopolo de seis secciones tipo sólido

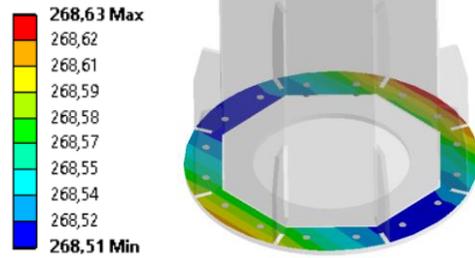
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MEF-06	Monopolo:	Seis secciones tipo sólido
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	10000 N	Octógono	248 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	506237	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	296093	Calidad de mallado:	0.7
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Desplazamiento Máximo		Esfuerzos de Von Misses	
 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>398,45 Max 354,18 309,91 265,64 221,36 177,09 132,82 88,545 44,273 0 Min</p>		 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>300,14 Max 266,79 233,44 200,1 166,75 133,4 100,05 66,698 33,349 4,939e-9 Min</p>	

SECCIÓN 1

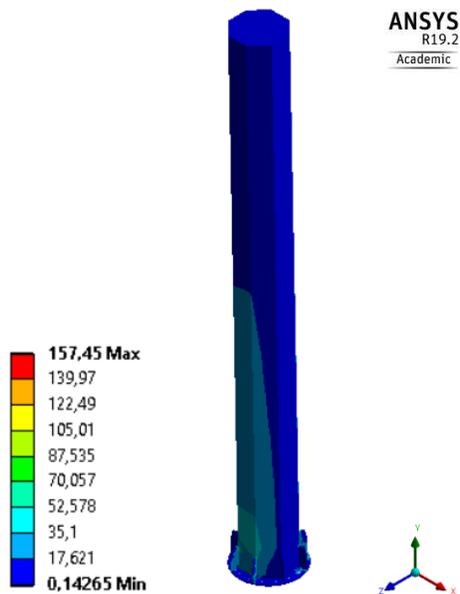
Desplazamiento



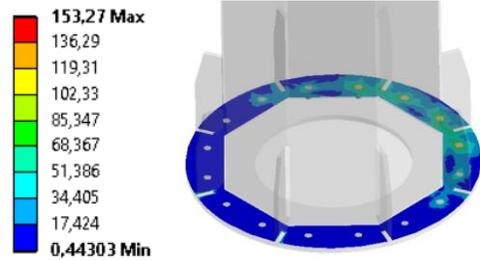
Desplazamiento de la brida inferior



Esfuerzo de Von Mises

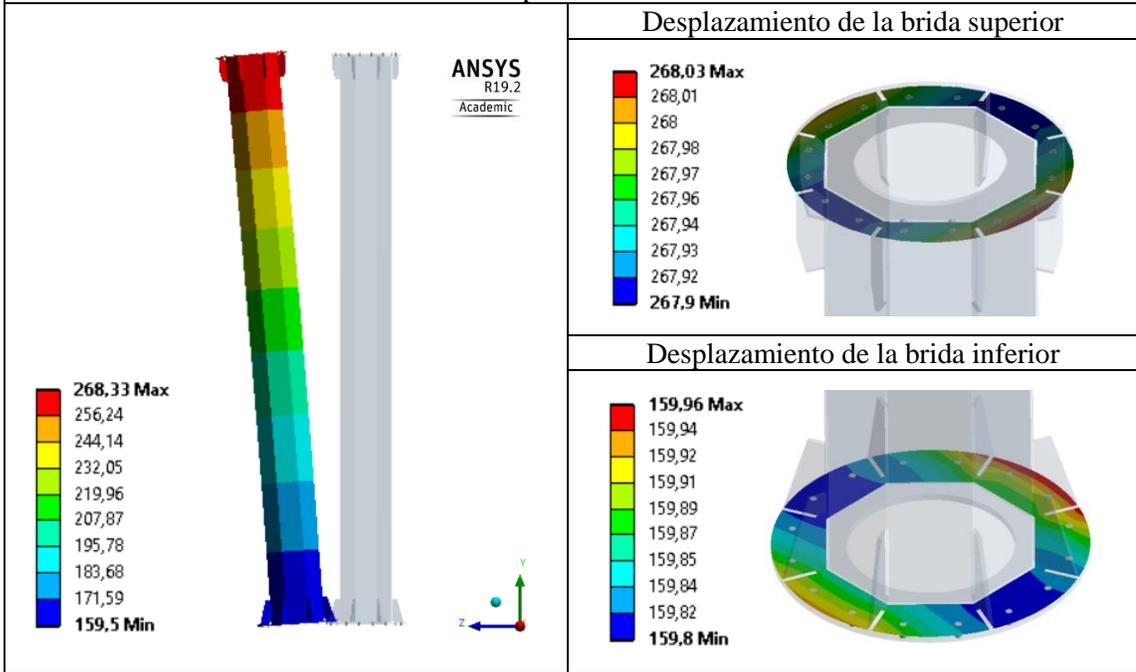


Esfuerzos de Von Mises de la brida inferior

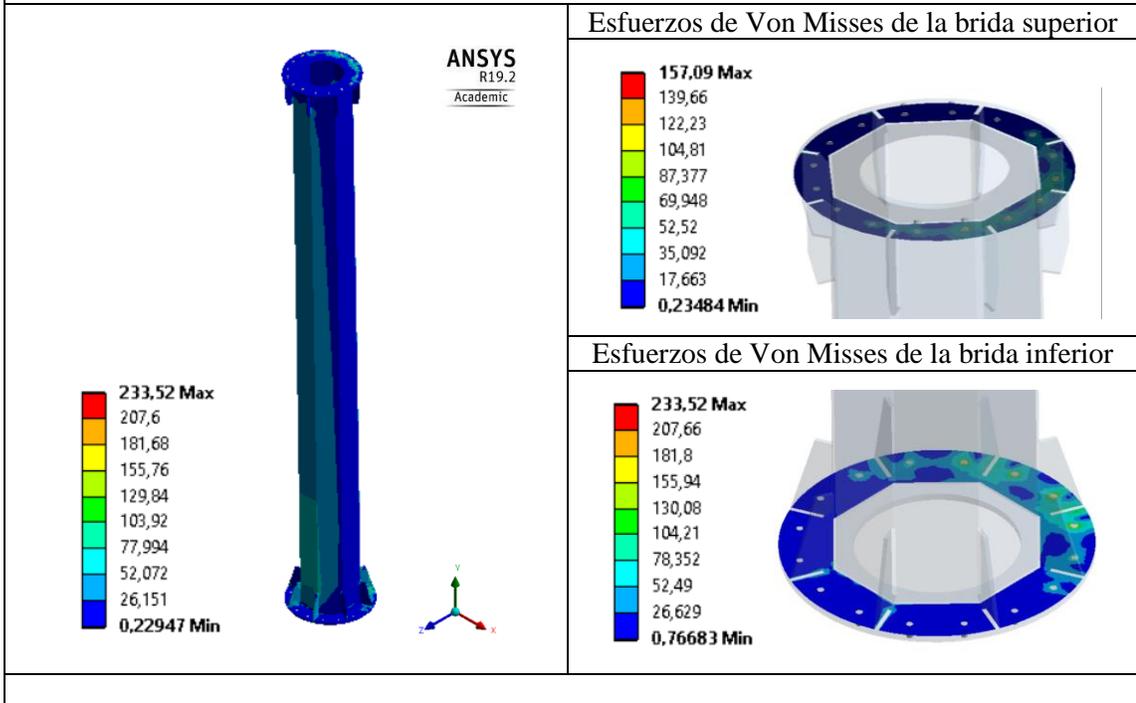


SECCIÓN 2

Desplazamiento

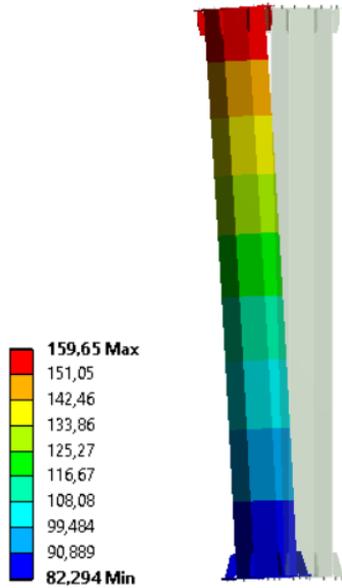


Esfuerzo de Von Mises

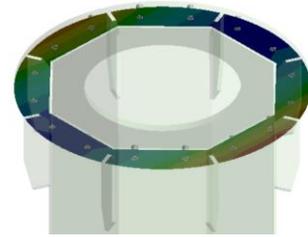
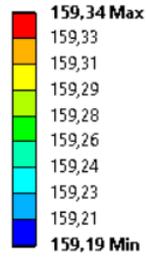


SECCIÓN 3

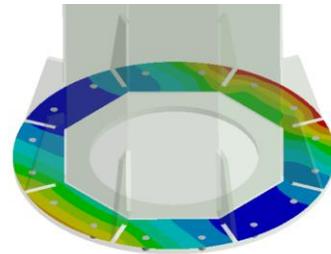
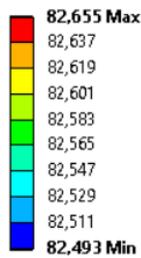
Desplazamiento



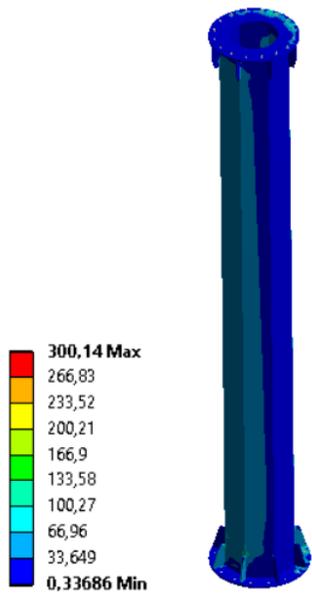
Desplazamiento de la brida superior



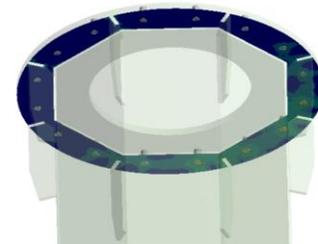
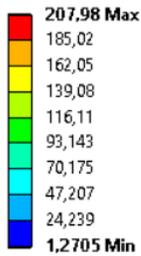
Desplazamiento de la brida inferior



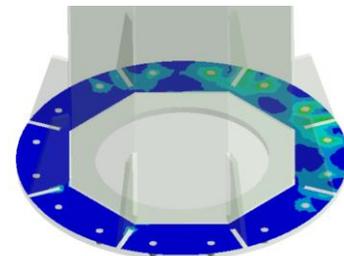
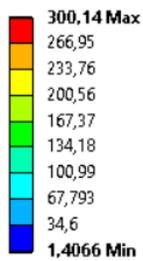
Esfuerzo de Von Mises



Esfuerzos de Von Mises de la brida superior

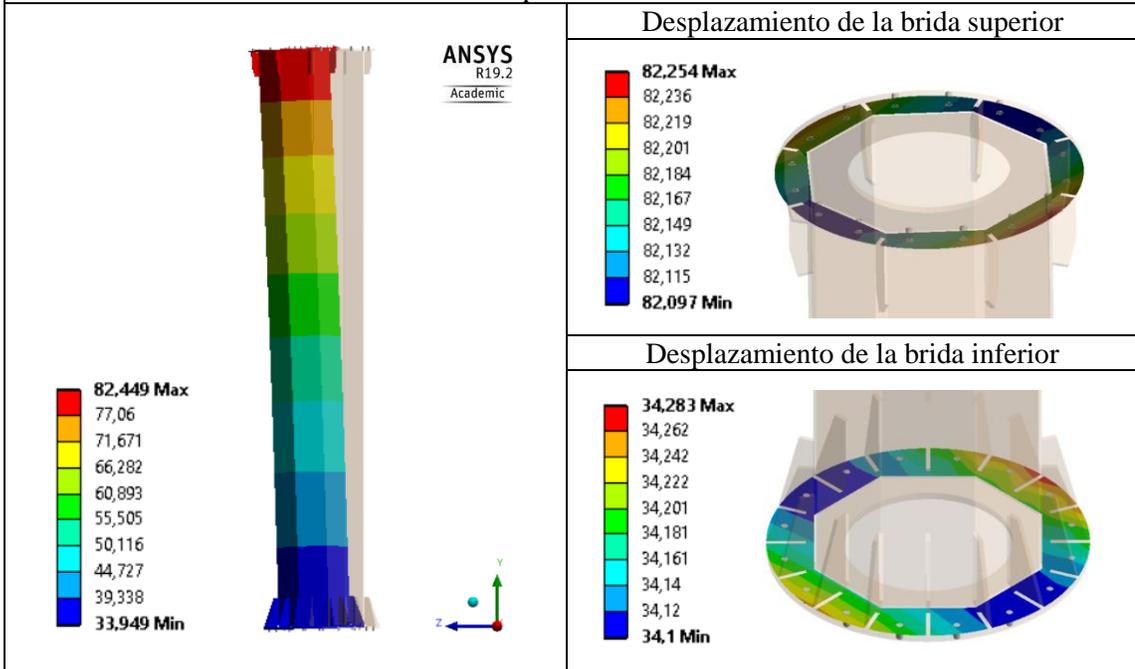


Esfuerzos de Von Mises de la brida inferior

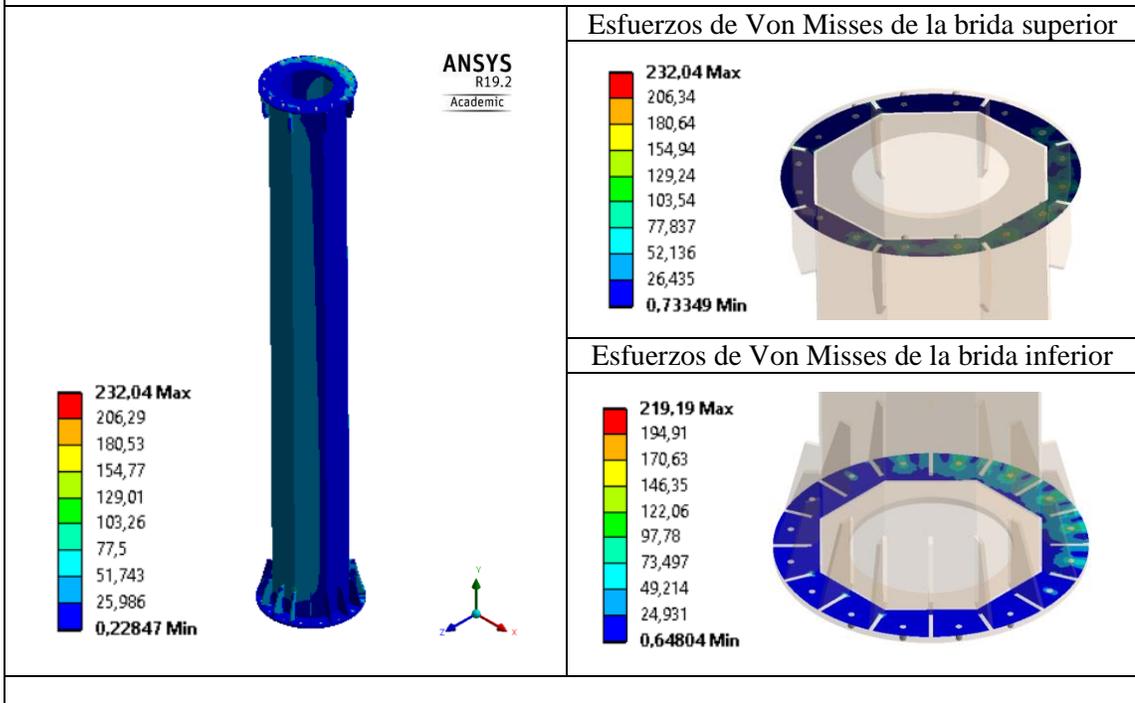


SECCIÓN 4

Desplazamiento

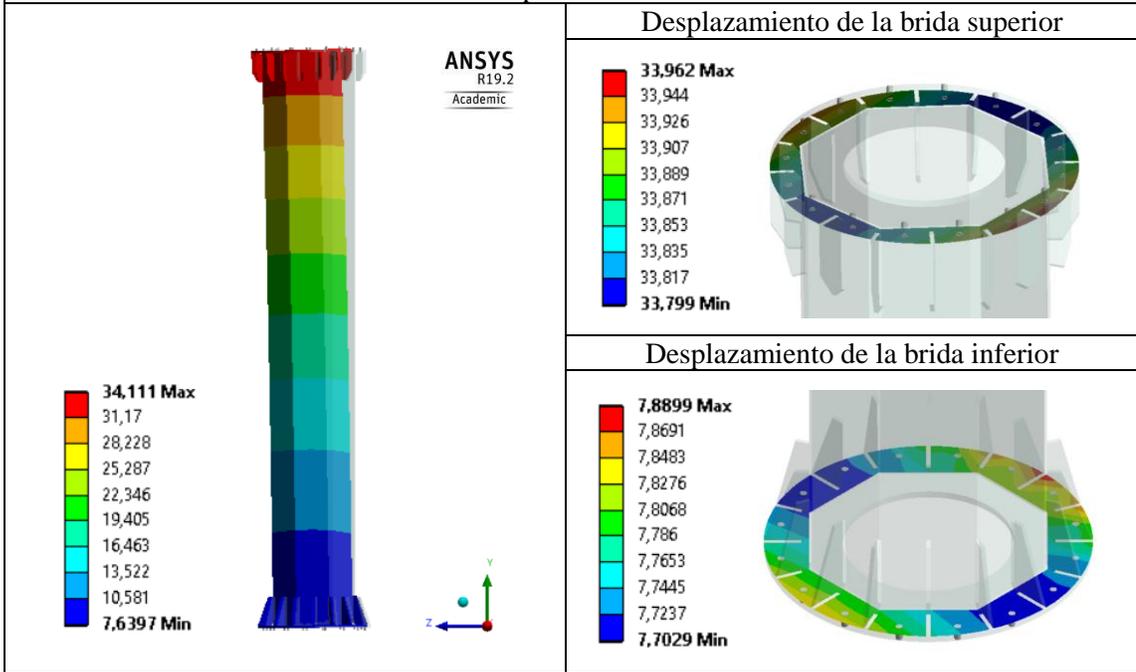


Esfuerzo de Von Mises

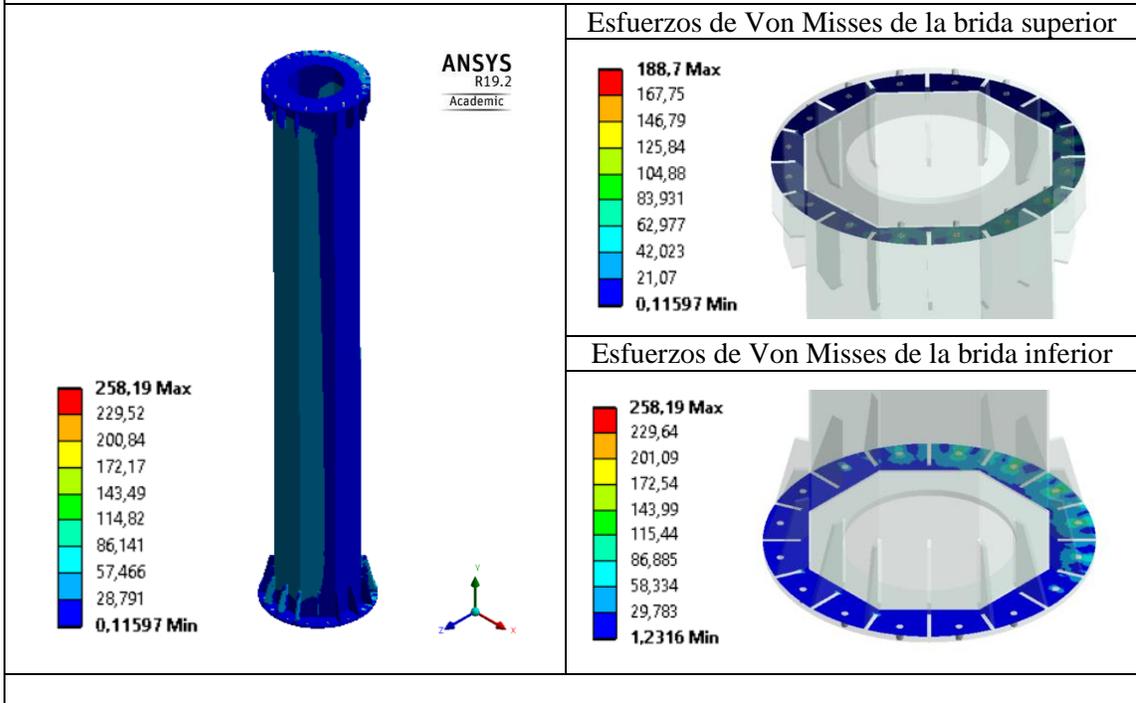


SECCIÓN 5

Desplazamiento

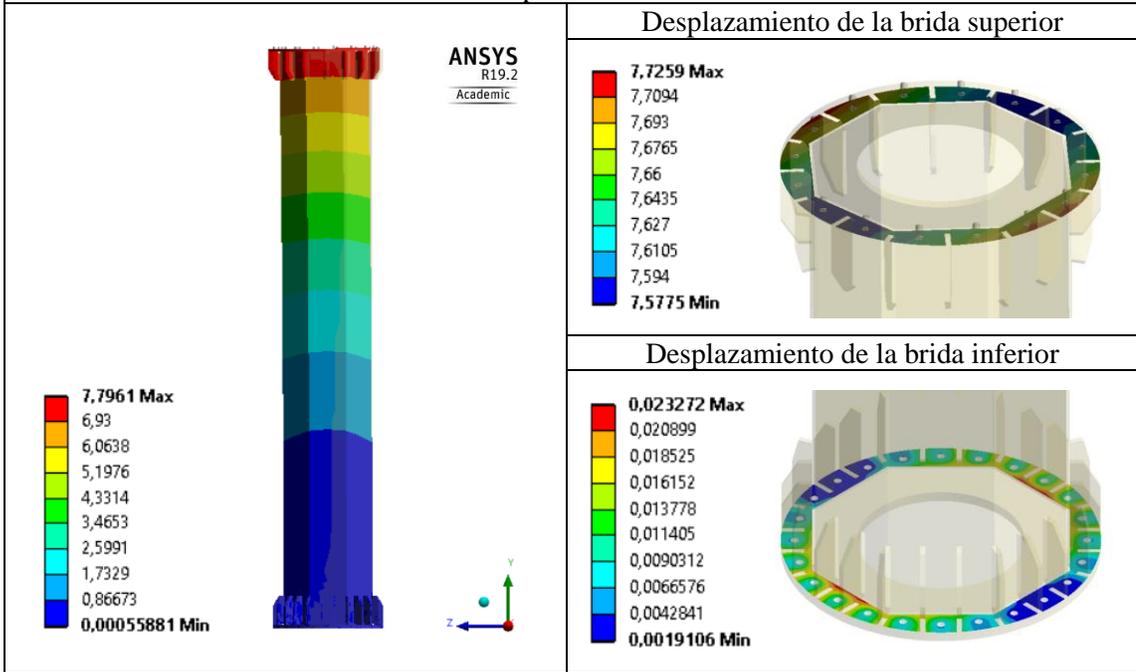


Esfuerzo de Von Mises

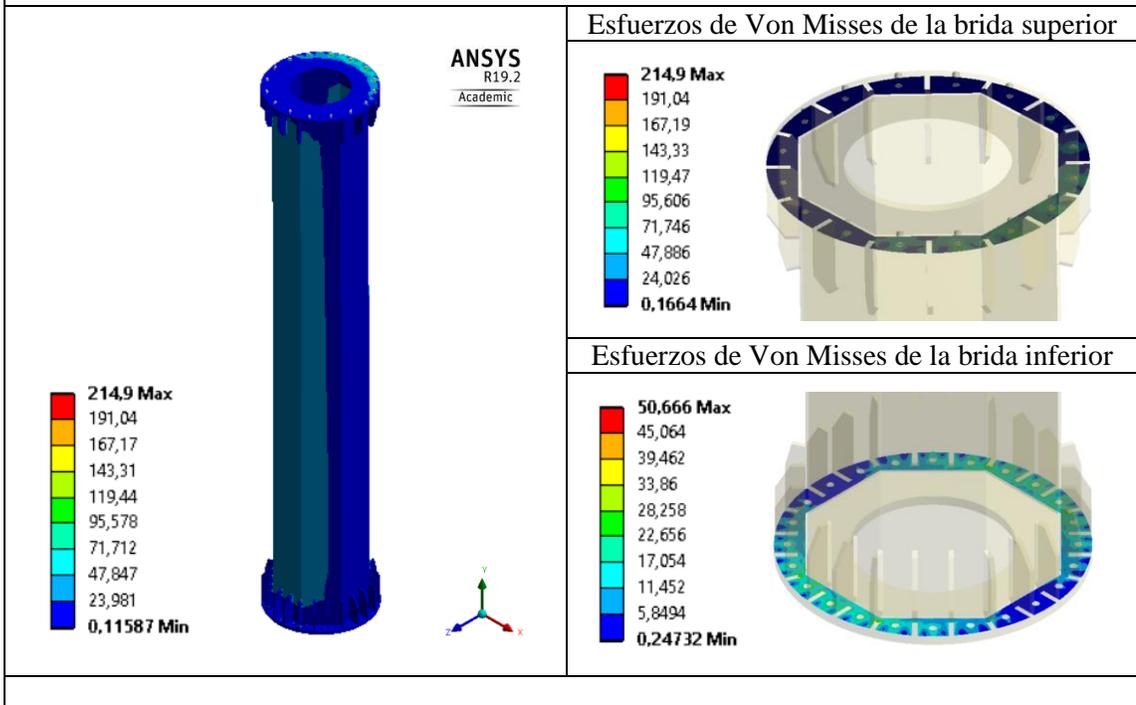


SECCIÓN 6

Desplazamiento



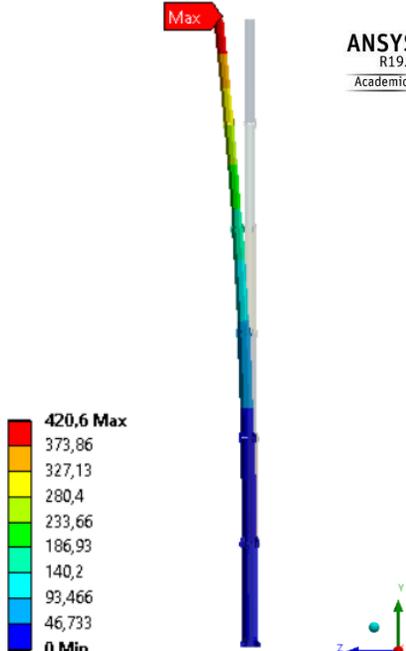
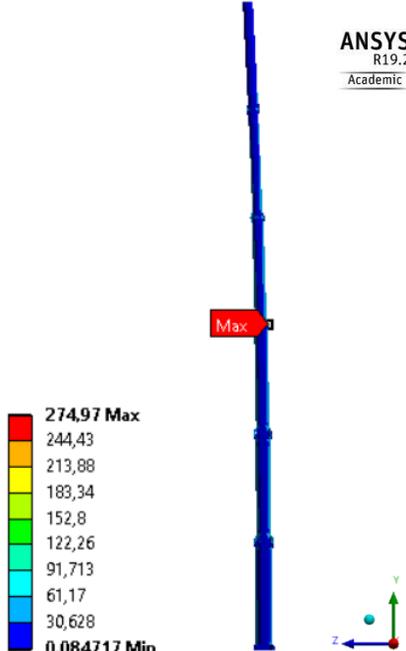
Esfuerzo de Von Mises



Fuente: [Autores]

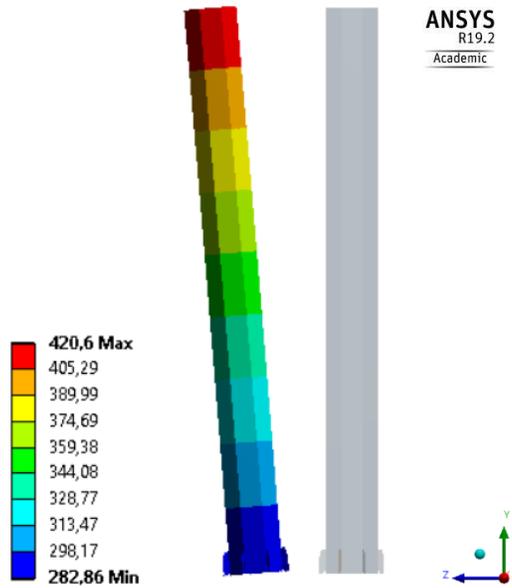
3.1.2.2.7. Simulación 7

Tabla 16.- Análisis de resultados de la simulación 7, monopolo de seis secciones tipo Shell

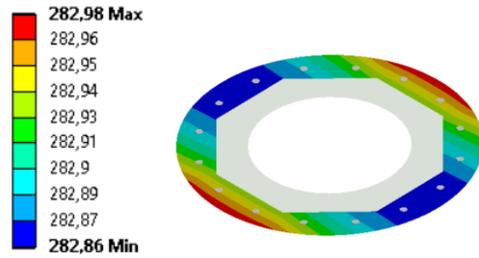
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MEF-07	Monopolo:	Seis secciones tipo shell
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	10000 N	Octógono	3 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	506237	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	296093	Calidad de mallado:	0.95
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Desplazamiento Máximo		Esfuerzos de Von Misses	
 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>420,6 Max</p> <p>373,86</p> <p>327,13</p> <p>280,4</p> <p>233,66</p> <p>186,93</p> <p>140,2</p> <p>93,466</p> <p>46,733</p> <p>0 Min</p>		 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>274,97 Max</p> <p>244,43</p> <p>213,88</p> <p>183,34</p> <p>152,8</p> <p>122,26</p> <p>91,713</p> <p>61,17</p> <p>30,628</p> <p>0,084717 Min</p>	

SECCIÓN 1

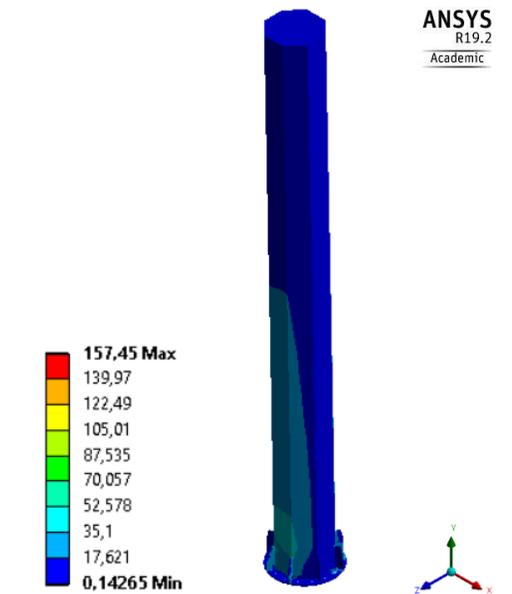
Desplazamiento



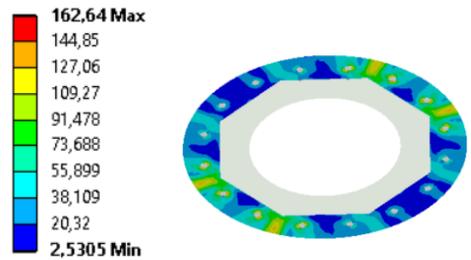
Desplazamiento de la brida inferior



Esfuerzo de Von Mises

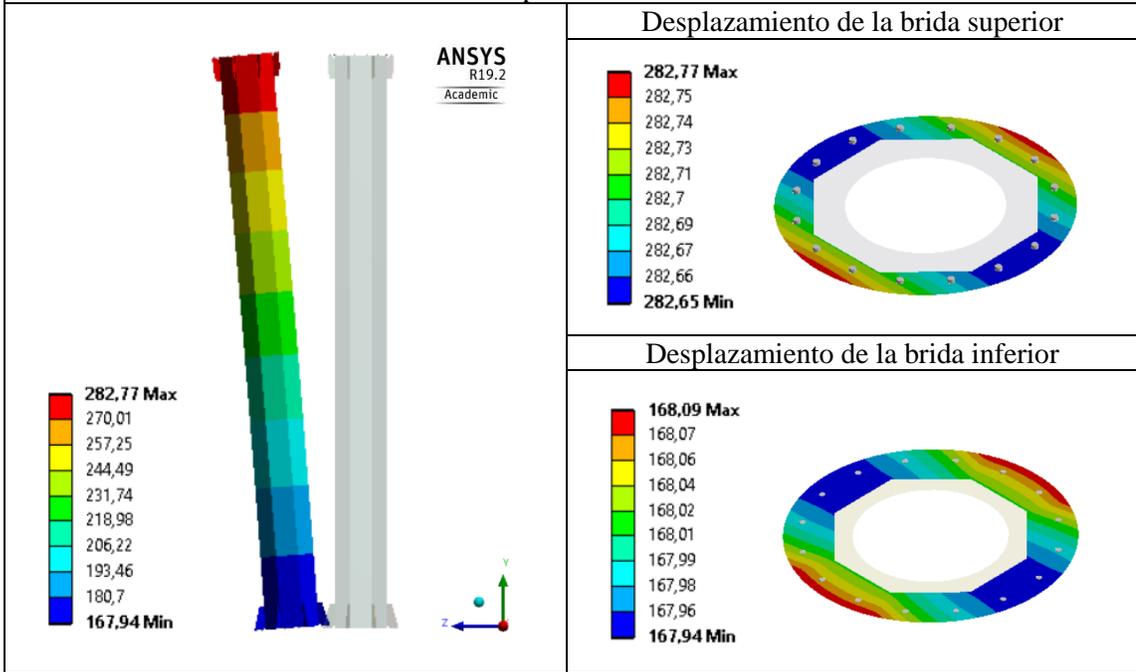


Esfuerzos de Von Mises de la brida inferior

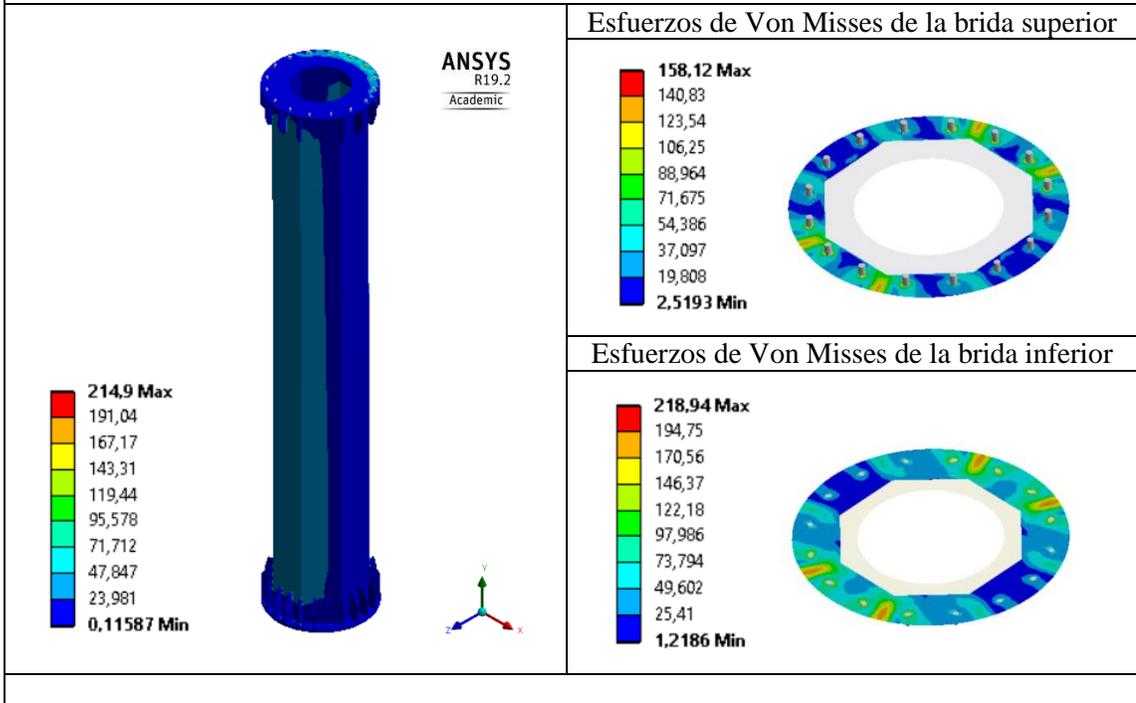


SECCIÓN 2

Desplazamiento

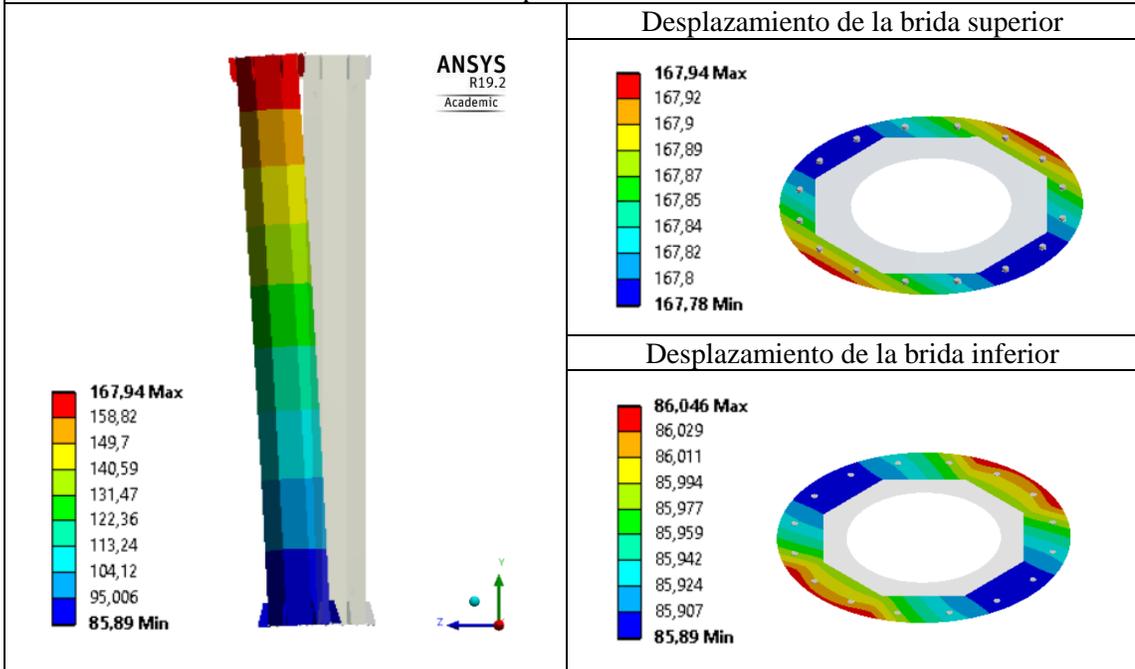


Esfuerzo de Von Mises

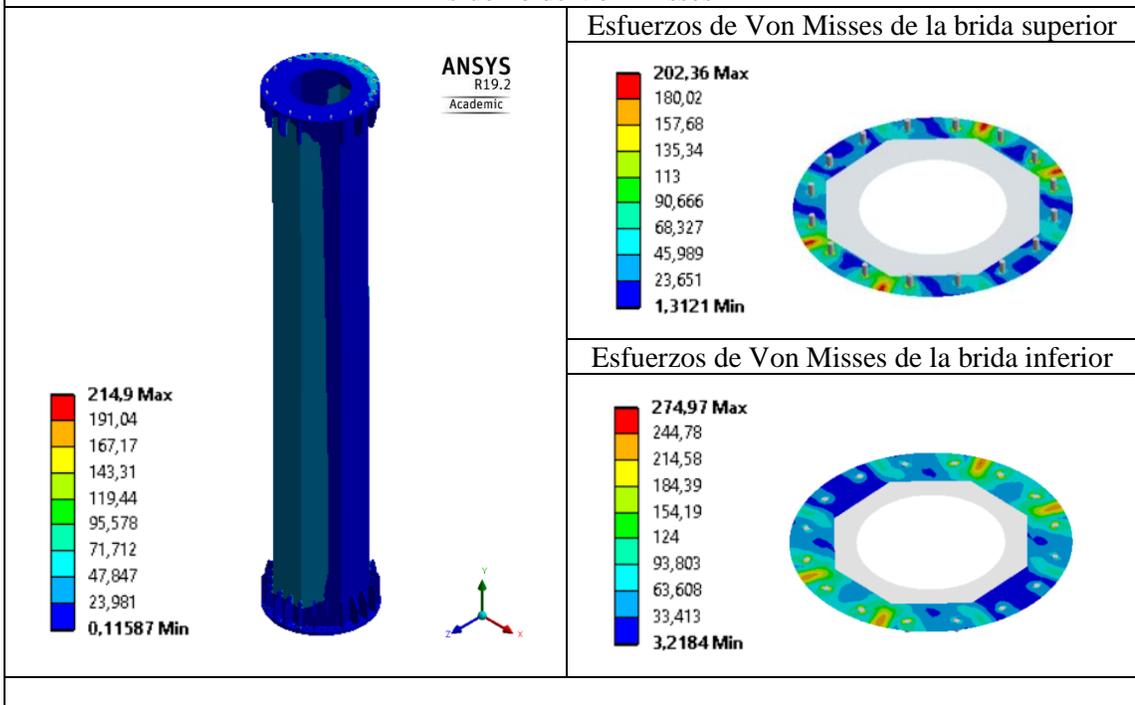


SECCIÓN 3

Desplazamiento

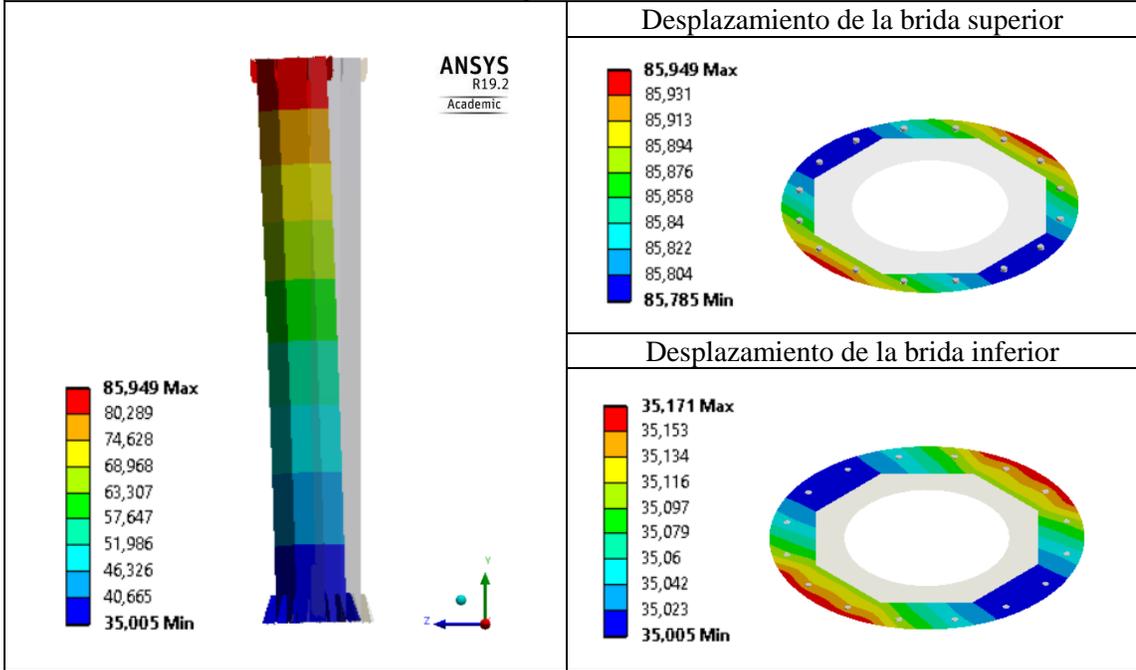


Esfuerzo de Von Mises

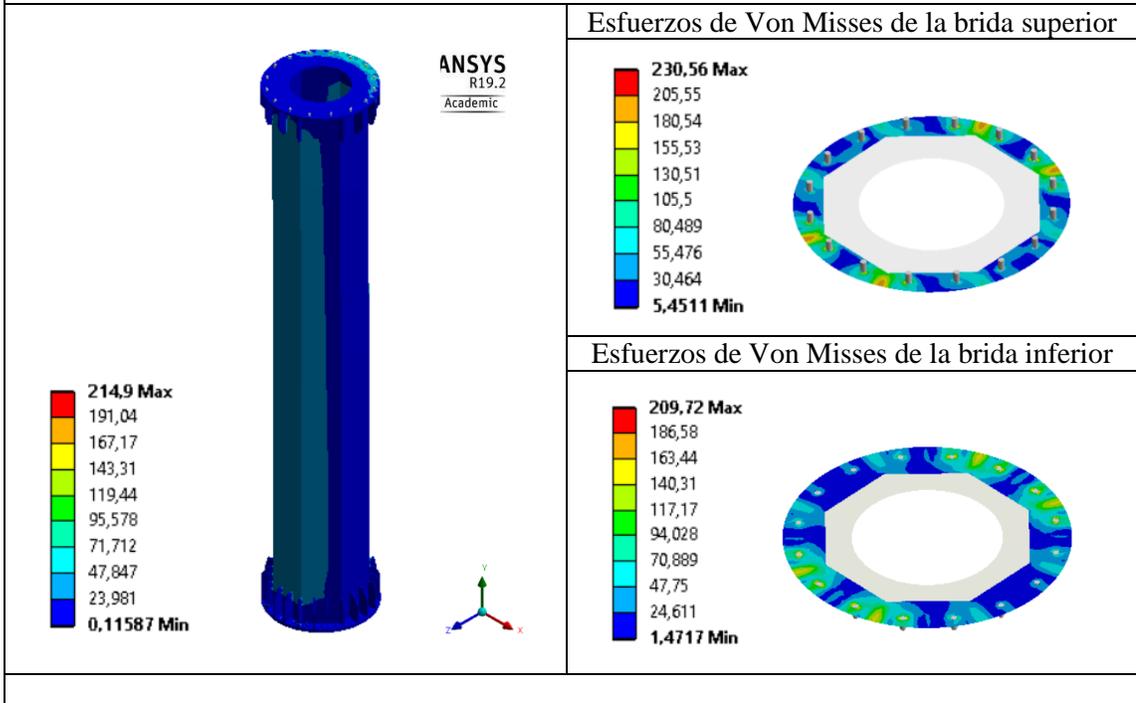


SECCIÓN 4

Desplazamiento

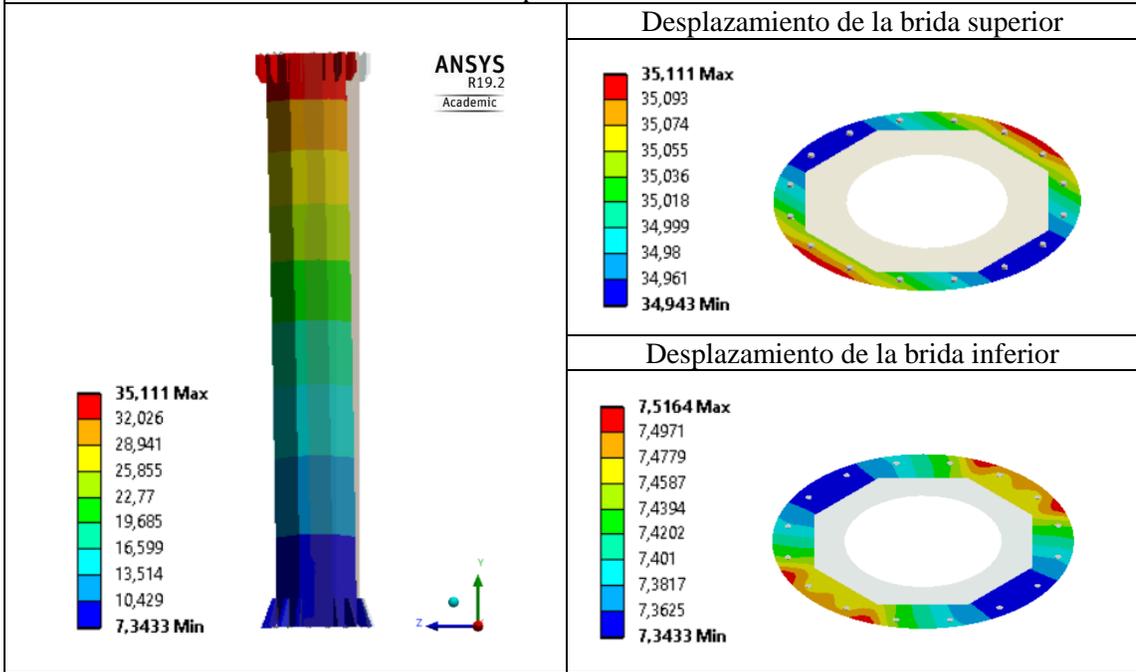


Esfuerzo de Von Mises

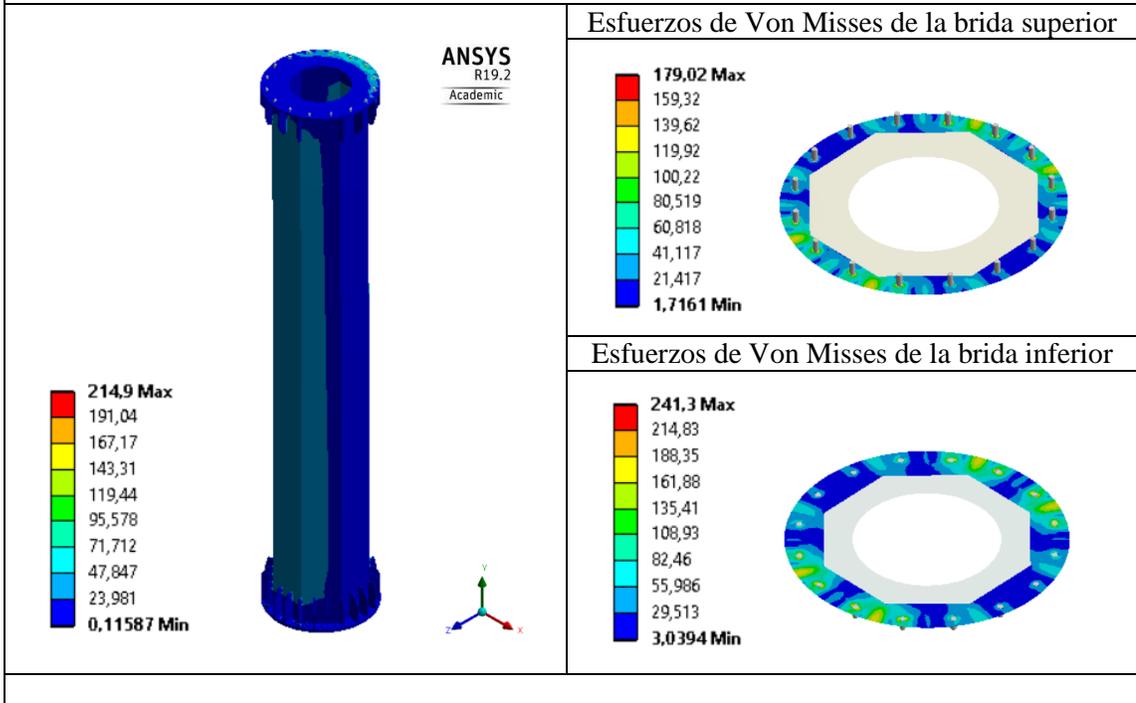


SECCIÓN 5

Desplazamiento

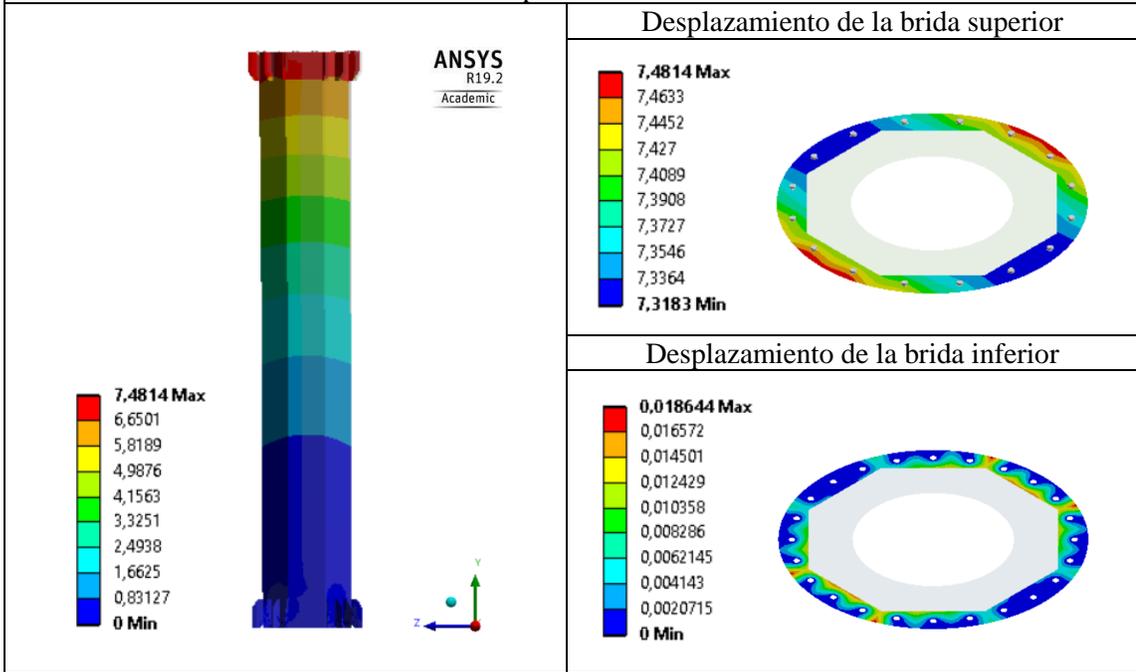


Esfuerzo de Von Mises

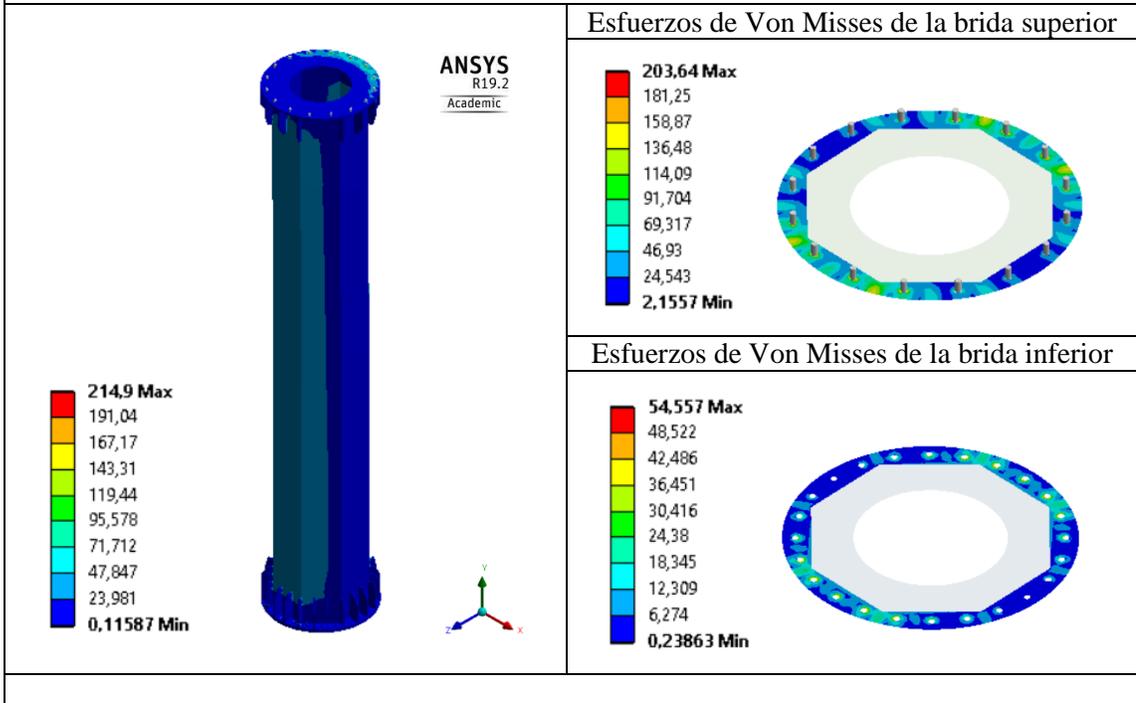


SECCIÓN 6

Desplazamiento



Esfuerzo de Von Mises



Fuente: [Autores]

Al revisar los resultados nos permite entender el comportamiento a flexión del monopolo. A continuación, en la tabla 17 se presenta el resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos.

La variación de resultados tiene un valor máximo de 5.56% en desplazamiento cuando se utiliza elementos solidos correspondientes a la simulación 6 y elementos tipo shell correspondientes a la simulación 7. De la misma manera, los esfuerzos de Von Misses presenta una variación de resultados máximo del 8.39% entre los dos casos de simulación. Este resultado valida la metodología aplicada para la creación del modelo de elementos finitos con elementos sólidos y elementos shell, permitiendo reducir el tiempo de análisis de 248 a 3 minutos respectivamente.

Tabla 17.- Comparación de resultados de desplazamiento y esfuerzos para el monopolo de seis secciones

Descripción	Desplazamiento máximo eje Z [mm]			Esfuerzo de Von Misses [MPa]		
	MEF Sólido	MEF Shell	Variación resultados	MEF Sólido	MEF Shell	Variación resultados
Total	398,45	420,60	5,56%	300,14	274,97	8,39%
Brida 1 inf	268,63	282,98	5,34%	153,27	162,64	6,11%
Brida 2 sup	268,03	282,77	5,50%	157,09	158,12	0,66%
Brida 2 inf	159,96	168,09	5,08%	233,52	218,94	6,24%
Brida 3 sup	159,34	167,94	5,40%	207,98	202,36	2,70%
Brida 3 inf	82,65	86,05	4,11%	300,14	274,97	8,39%
Brida 4 sup	82,25	85,95	4,50%	232,04	230,56	0,64%
Brida 4 inf	34,28	35,17	2,60%	219,19	209,72	4,32%
Brida 5 sup	33,96	35,11	3,39%	188,70	179,02	5,13%
Brida 5 inf	7,89	7,52	4,69%	258,19	241,30	6,54%
Brida 6 sup	7,73	7,48	3,23%	214,90	203,64	5,24%
Brida 6 inf	0,02	0,02	0,00%	50,67	54,56	7,67%

Fuente: [Autores]

Una vez identificado el comportamiento a flexión presente en una estructura monopolo y conociendo los valores de desplazamiento y esfuerzos máximos en sus puntos estratégicos, se precede a la determinación del prototipo que permita la recreación de su comportamiento de la estructura a escala y su validación mediante ensayos físicos.

3.1.3. Prototipo de análisis

3.1.3.1. Concepción del prototipo

Partiendo de los resultados obtenidos en el análisis mediante elementos finitos de la estructura tipo monopolo de seis secciones, la deformación máxima obtenida es aproximadamente de 400 mm y su longitud total de 36000 mm, nos permiten calcular el ángulo de rotación que experimenta la estructura:

$$\theta_M = \frac{\delta_M}{L_M}$$
$$\theta_M = \frac{400 \text{ mm}}{36000 \text{ mm}}$$
$$\theta_M = \frac{1}{90}$$

Sabiendo que la pendiente de la curva de deflexión o ángulo de rotación determinada en la estructura debe ser igual en cualquier longitud:

$$(\theta_M = \theta_P)$$

Calculamos la deformación equivalente presente en el prototipo, con una longitud propuesta de 2000 mm:

$$\theta_P = \frac{\delta_P}{L_P}$$
$$\delta_P = \theta_P * L_P$$
$$\delta_P = \frac{1}{90} * 2000 \text{ mm}$$
$$\delta_P = 22.22 \text{ mm}$$

Determinando que, en relación al monopolo de 36 metros analizado el desplazamiento equivalente del prototipo resultante debe ser de 22.22 mm.

Por otro lado, conservando el valor de la rigidez y conociendo que el esfuerzo máximo obtenido es aproximadamente de 300 MPa, son datos esenciales para encontrar la geometría óptima del prototipo, partiendo de medidas equivalentes a las del modelo real tanto en diámetro, espesor de pared, espesor de bridas y soportes, y empleando el software de elementos finitos que permita validar los resultados.

Mediante ensayos experimentales se obtuvo los resultados mostrado en la tabla 18, concluyendo que el esfuerzo máximo equivalente se cumple con un diámetro de 101.6 mm, espesor de pared de 4 mm y sus bridas específicas para una longitud de 2000 mm, obteniendo un valor de esfuerzo máximo de 298 MPa. Para mayor detalle de la geometría consulte el ANEXO 5.

Tabla 18.- Consideraciones de ensayos experimentales para la concepción del prototipo

N° Ensayo	Secciones		Juntas bridadas				Esfuerzo máximo [MPa]	
	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Diámetro [mm]	Espesor brida sup [mm]	Espesor cartela sup [mm]	Espesor brida inf [mm]		Espesor cartela inf [mm]
1	127	2	190	5	3	5	3	268
2	127	3	190	8	3	8	3	183
3	127	4	190	5	3	5	3	423
4	127	4	190	8	3	8	3	235
5	101,6	2	190	5	3	5	3	150
6	101,6	4	190	5	3	5	3	262
7	101,6	4	190	5	6	6	6	268
8	101,6	4	180	5	6	6	6	344
9	101,6	4	180	6	6	6	6	266
10	101,6	4	175	5	8	6	8	334
11	101,6	4	175	5,5	8	6	8	294
12	101,6	4	175	5,5	6	6,3	8	298

Fuente: [Autores]

Al revisar las consideraciones de los ensayos experimentales nos permite concluir que, la estructura presenta esfuerzos menores al reducir el diámetro de la sección; todo lo contrario, los esfuerzos presentan una tendencia creciente al incrementar el espesor de la sección. Sin embargo, al incrementar el diámetro de las juntas bridadas el esfuerzo disminuye; de manera similar a lo anterior, las cartelas influyen inversamente a los valores de esfuerzo, por ello un mayor espesor reduce el esfuerzo.

Tomando en cuenta todas las consideraciones antes mencionadas, se genera un modelo simplificado equivalente como el que se muestra en la figura 23:

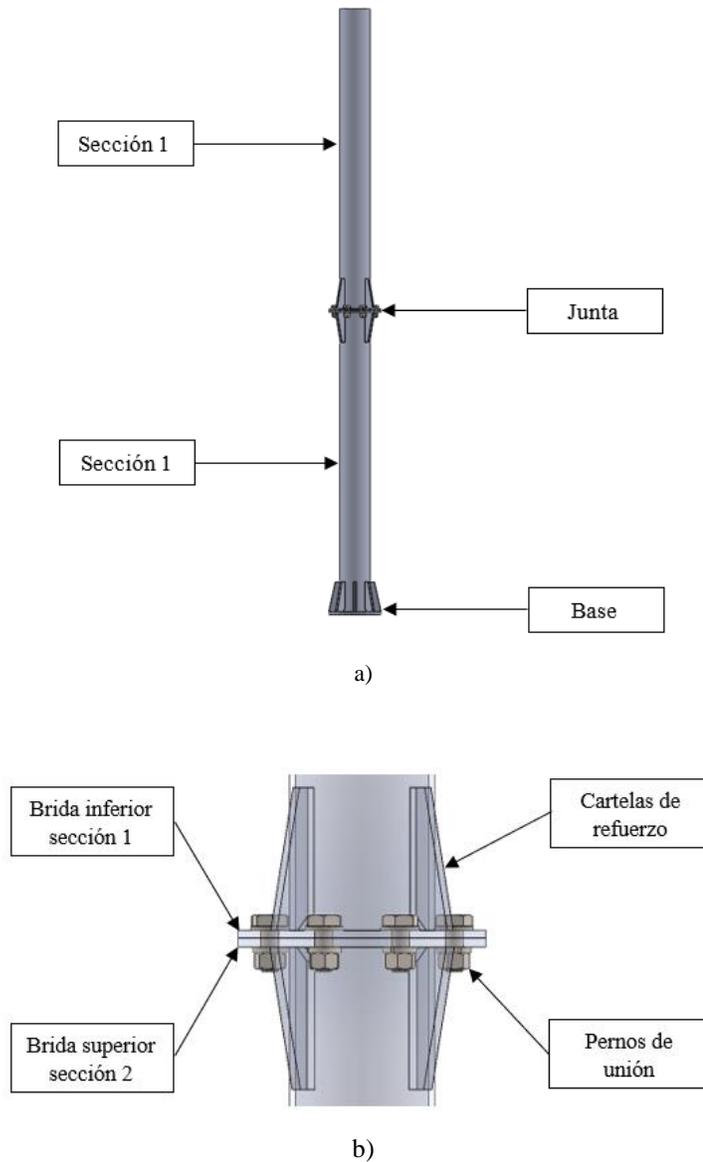


Figura 23.- Prototipo equivalente a la estructura monopolo a) Configuración general y b) Junta brida de unión [Autores]

A continuación, se procede a resumir la metodología de análisis por elementos finitos para la estructura prototipo equivalente.

3.1.3.2. Análisis mediante elementos finitos del prototipo

Para el desarrollo del análisis se aplicará una fuerza equivalente de 2533.4 N en la parte superior de la estructura como se muestra en la figura 24, que simula de manera puntual la carga lateral que ejerce el viento.



Figura 24.- Aplicación de carga en el prototipo [Autores]

La simulación es estructural estática, se reemplazó los pernos de unión entre bridas por conexiones tipo “beam” que representan adecuadamente su comportamiento y evita la utilización de contactos, que dificultan el proceso e incrementan el tiempo de análisis. La conexión entre bridas se simula utilizando un contacto tipo “Frictionless” que permite la separación entre placas y su respectivo deslizamiento.

Para una mejor aproximación en los resultados se realiza un refinamiento del mallado en las juntas de unión de la estructura, como se muestra en la figura 25:

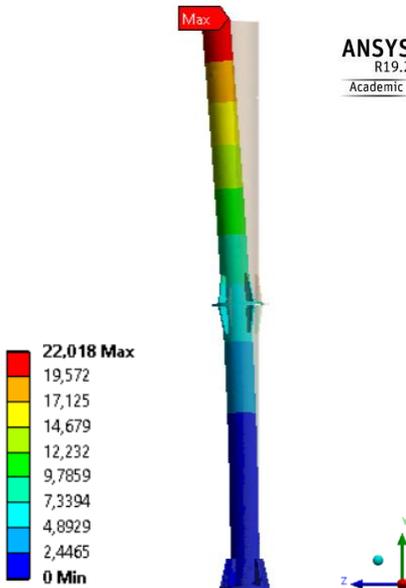
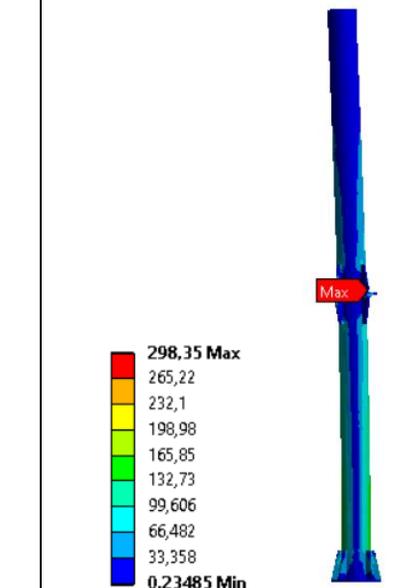


Figura 25.- Refinamiento en las juntas bridadas de la estructura [Autores]

Al revisar los resultados obtenidos de la simulación nos permite entender el comportamiento a flexión presente en la estructura-prototipo de manera simplificada. A continuación, en la tabla 19 y tabla 20 se presenta el resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos con elementos sólidos y elementos Shell respectivamente.

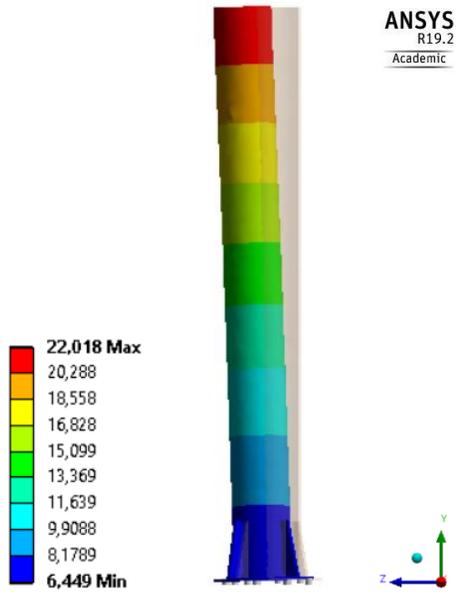
3.1.3.2.1. Simulación de prototipo 1

Tabla 19.- Análisis de resultados de la simulación 8, prototipo tipo sólido

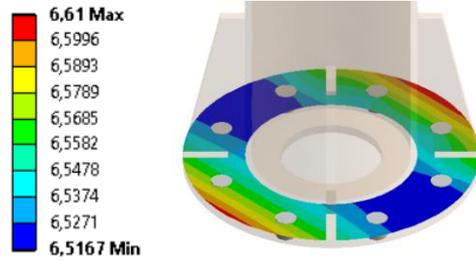
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MEF - P01	Monopolo:	Prototipo
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	2533.4 N	Circular hueca	12 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	155873	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	83221	Calidad de mallado:	0.75
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Desplazamiento Máximo		Esfuerzos de Von Misses	
 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>22,018 Max</p> <p>19,572</p> <p>17,125</p> <p>14,679</p> <p>12,232</p> <p>9,7859</p> <p>7,3394</p> <p>4,8929</p> <p>2,4465</p> <p>0 Min</p>		 <p>ANSYS R19.2 Academic</p> <p>298,35 Max</p> <p>265,22</p> <p>232,1</p> <p>198,98</p> <p>165,85</p> <p>132,73</p> <p>99,606</p> <p>66,482</p> <p>33,358</p> <p>0,23485 Min</p>	

SECCIÓN 1

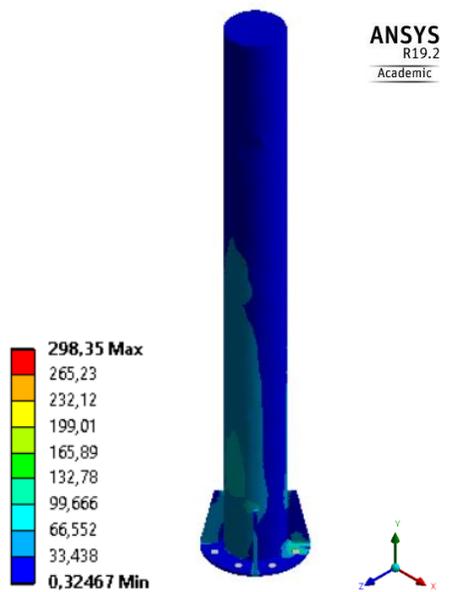
Desplazamiento



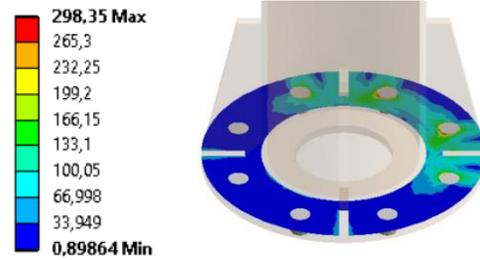
Desplazamiento de la brida inferior



Esfuerzo de Von Mises

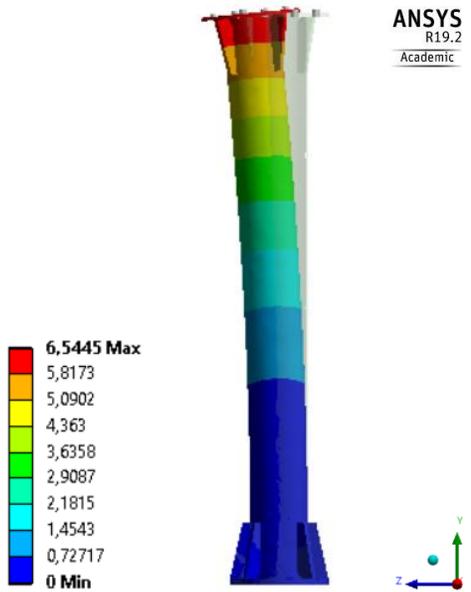


Esfuerzos de Von Mises de la brida inferior

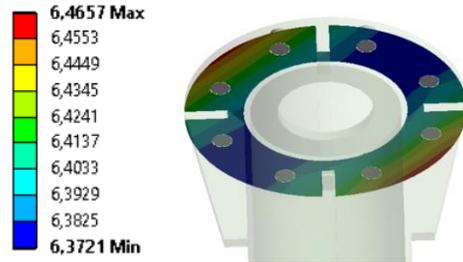


SECCIÓN 2

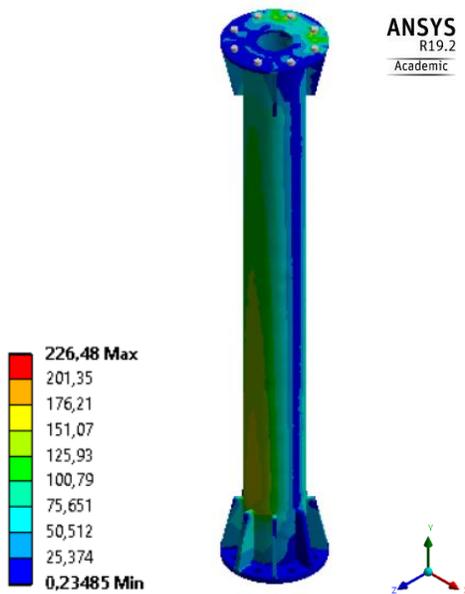
Desplazamiento



Desplazamiento de la brida superior



Esfuerzo de Von Mises



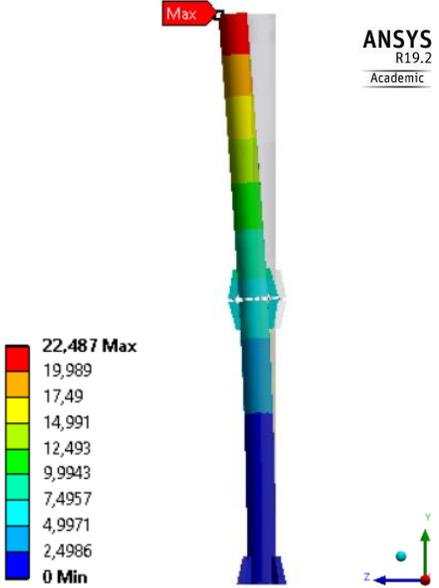
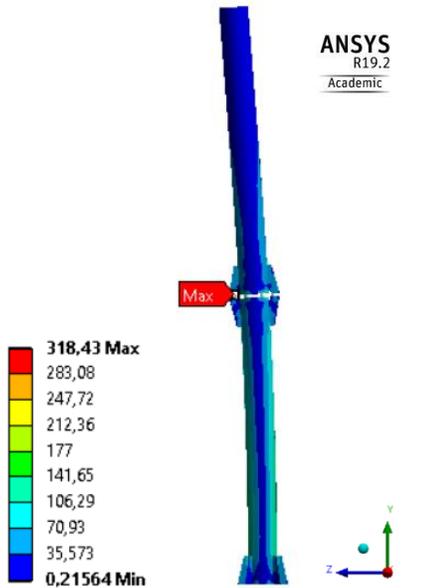
Esfuerzos de Von Mises de la brida superior



Fuente: [Autores]

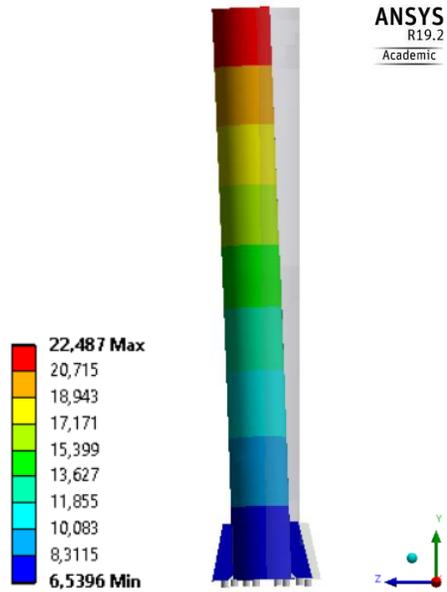
3.1.3.2.2. Simulación de prototipo 2

Tabla 20.- Análisis de resultados de la simulación 9, prototipo tipo Shell

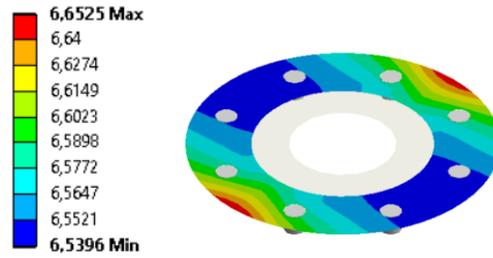
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MEF-P02	Monopolo:	Prototipo
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	2533.4 N	Circular hueca	1 min
Software utilizado:	ANSYS Research, LS DYNA		
N° de nodos:	155873	Tipo de análisis:	Estático Estructural
N° de elementos:	83221	Calidad de mallado:	0.75
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS DE SIMULACIÓN			
Desplazamiento Máximo		Esfuerzos de Von Misses	
			

SECCIÓN 1

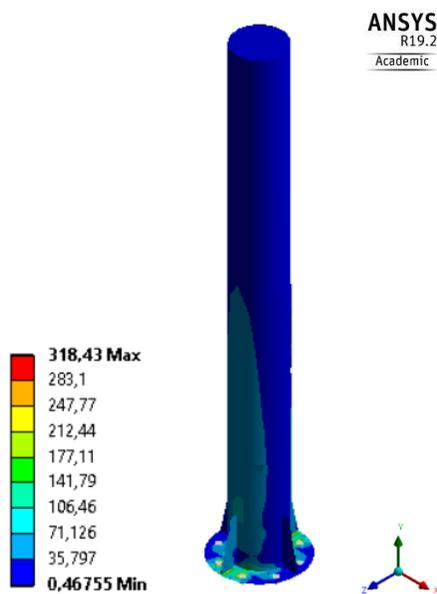
Desplazamiento



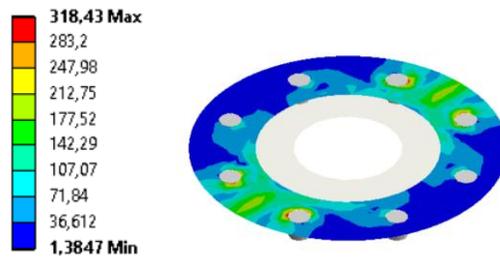
Desplazamiento de la brida inferior



Esfuerzo de Von Mises

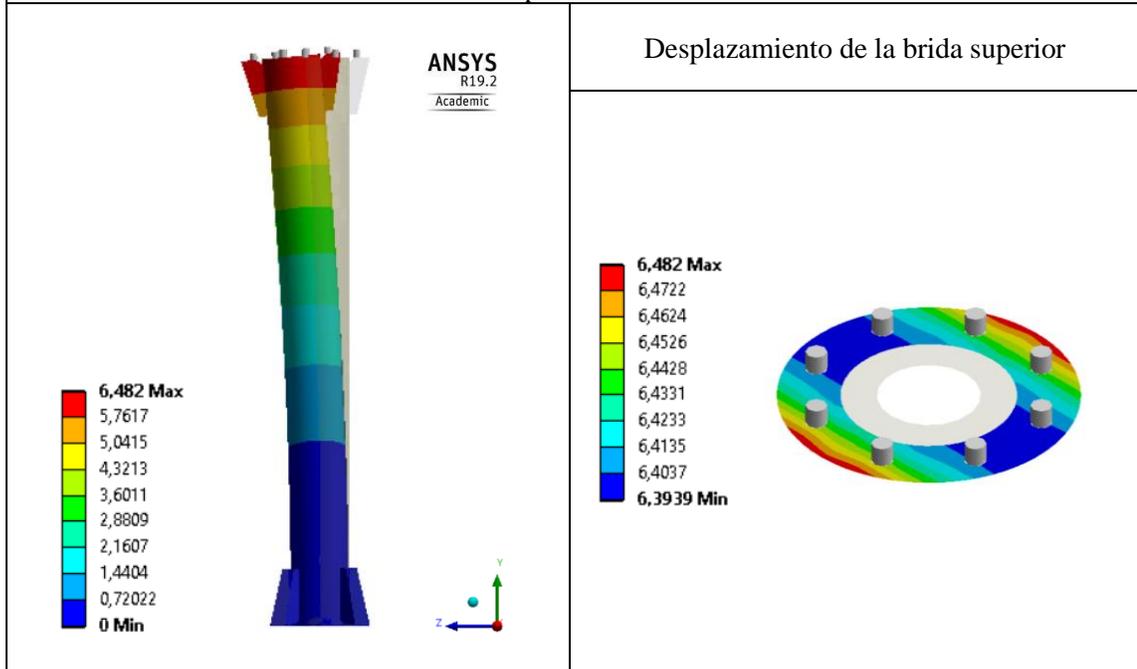


Esfuerzos de Von Mises de la brida inferior



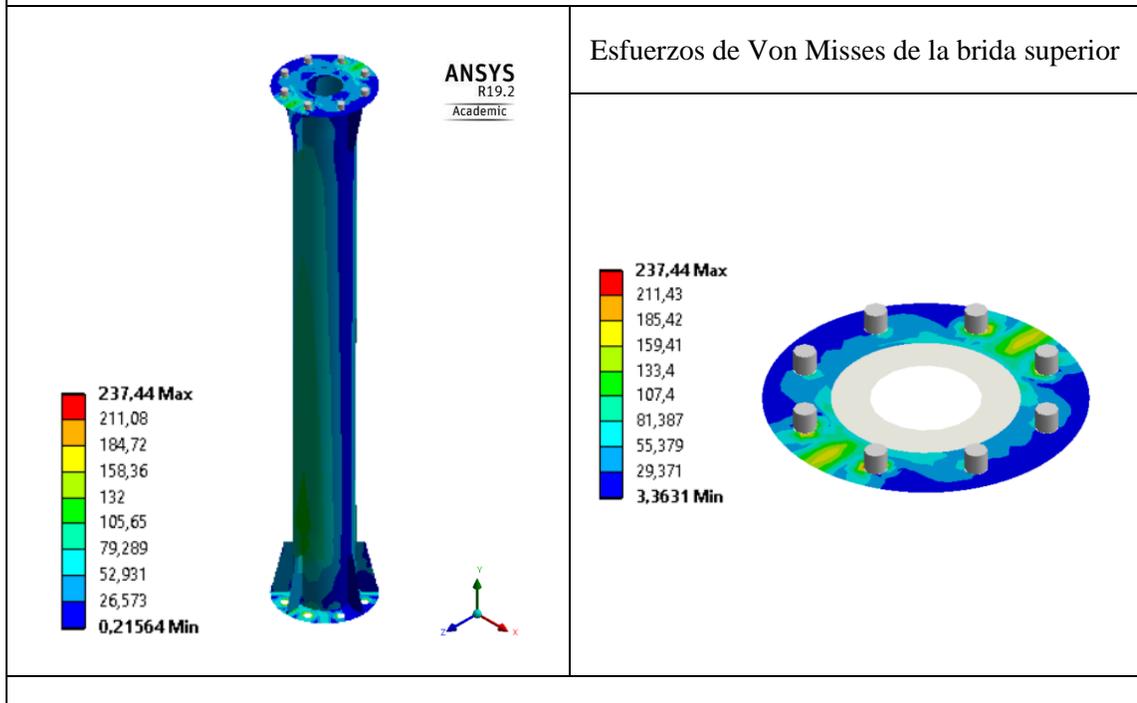
SECCIÓN 2

Desplazamiento



Observaciones:

Esfuerzo de Von Mises



Fuente: [Autores]

Al revisar los resultados nos permite entender el comportamiento a flexión de la estructura equivalente. A continuación, en la tabla 21 se presenta el resumen de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos.

La variación de resultados tiene un valor máximo de 2.09% en desplazamiento cuando se utiliza elementos sólidos correspondientes a la simulación 8 y elementos tipo shell correspondientes a la simulación 9. De la misma manera, los esfuerzos de Von Mises presenta una variación de resultados máximo del 6.73% entre los dos casos de simulación. Este resultado valida la metodología aplicada para la creación del modelo de elementos finitos con elementos sólidos y elementos shell, permitiendo reducir el tiempo de análisis de 12 a 1 minutos respectivamente.

Tabla 21.- Comparación de resultados de desplazamiento y esfuerzos para el prototipo

Descripción	Desplazamiento máximo eje Z [mm]			Esfuerzo de Von Mises [MPa]		
	MEF Sólido	MEF Shell	Variación resultados	MEF Sólido	MEF Shell	Variación resultados
Total	22,02	22,48	2,09%	298,35	318,43	6,73%
Brida 1 inf	6,61	6,65	0,61%	298,35	318,43	6,73%
Brida 2 sup	6,47	6,48	0,15%	226,48	237,44	4,84%
Base	0	0	0,00%	0,23	0,22	4,35%

Fuente: [Autores]

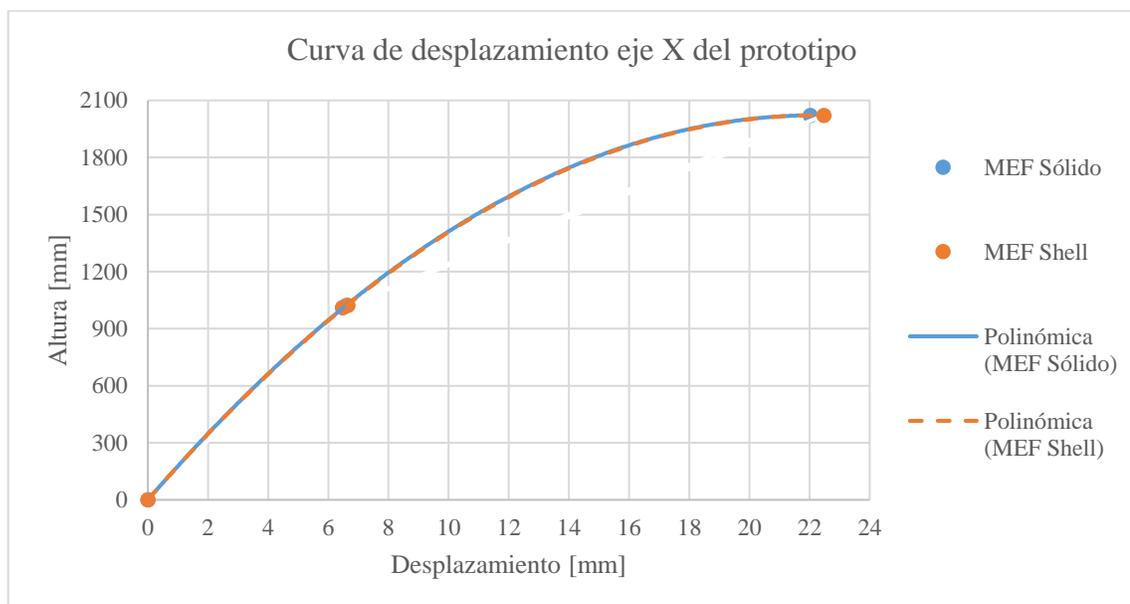


Figura 26.- Curva de desplazamiento en función de la altura del prototipo [Autores]

Conociendo los valores de desplazamiento en los puntos estratégicos del prototipo y aplicando una tendencia polinómica nos permite identificar el comportamiento a flexión presente en la estructura en función de su altura, como se muestra en la figura 26.

Con el objetivo de mejorar de verificación y validación de los resultados se precede a la determinación de los desplazamientos máximos variando la fuerza de análisis, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 22. Estos resultados son directamente proporcionales a la fuerza, como se muestra en la figura

Tabla 22.- Desplazamientos máximos obtenidos al variar la fuerza de análisis en el prototipo

Fuerza		Desplazamiento máximo eje Z [mm]	
[Kg]	[N]	MEF Sólido	MEF Shell
20	196,2	1,7053	1,7415
40	392,4	3,4105	3,4830
60	588,6	5,1158	5,2246
80	784,8	6,8210	6,9661
100	981,0	8,5263	8,7076
120	1177,2	10,2320	10,4490
140	1373,4	11,9370	12,1910
160	1569,6	13,6420	13,9320
180	1765,8	15,3470	15,6740
200	1962,0	17,0530	17,4150
220	2158,2	18,7580	19,1570
240	2354,4	20,4630	20,8980
258,25	2533,4	22,0190	22,4870
260	2550,6	22,1630	22,6400

Fuente: [Autores]

3.1.3.3. Ensayo físico del prototipo

El objetivo de esta etapa es entender el comportamiento físico de la estructura, y su respectiva validación con los ensayos experimentales.

Los ensayos físicos se realizaron en un banco de pruebas temporal, adaptando las condiciones necesarias para su correcto desarrollo. Cuenta con los elementos necesarios para llevar a cabo el análisis estático estructural, mismos que se detallan a continuación:

Tabla 23.- Elementos constitutivos del banco de ensayos

N° de elemento	Gráfica	Descripción
1		Celda de carga
2		Reloj comparador
3		Tensor
4		Torquímetro

Fuente: [Autores]

Procedimiento de ensayo físico

Para la realización del ensayo físico a flexión del prototipo, previamente es necesario identificar su comportamiento mediante análisis de elementos finitos. A continuación, se describe el procedimiento para la correcta realización del ensayo:

1. Preparación del banco de pruebas
2. Montaje de estructura
3. Instalación de equipos y herramientas de medición
4. Ensayos experimentales
5. Toma y registro de datos

El procedimiento de ensayo físico se resume en la tabla 24:

Tabla 24.- Ensayo físico del prototipo

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Ensayo físico:	EF -01	Monopolo:	Prototipo
Normativa:			
Características del ensayo:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de ensayo:
	2533.4	Circular hueca	120 min
Equipo:	Banco de pruebas	Tipo de ensayo:	Ensayo físico
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	27/04/2019
 			



Fuente: [Autores]

A continuación, se presentan los resultados de desplazamiento obtenidos después de haber realizado el ensayo físico en relación a la carga aplicada en el extremo superior de la estructura. Como se observa en la Tabla 25, se realizaron tres mediciones que permitan validar el dato registrado en el ensayo y a su vez generar un valor promedio como dato de medición efectivo.

Tabla 25.- Resultados obtenidos del ensayo físico con variación de la fuerza aplicada

Fuerza		Desplazamiento eje X [mm]			
[Kg]	[N]	Medida1	Medida2	Medida3	Promedio
40	392,4	3,03	3,39	3,27	3,23
60	588,6	4,91	4,97	4,98	4,95
80	784,8	6,73	6,3	6,62	6,55
100	981	8,40	8,23	8,29	8,31
120	1177,2	10,23	10,1	9,89	10,07
140	1373,4	12,65	11,92	11,97	12,18
160	1569,6	13,99	13,44	13,52	13,65
180	1765,8	15,85	15,31	15,54	15,57
200	1962	17,81	16,59	16,98	17,13
220	2158,2	19,75	18,87	18,75	19,12
240	2354,4	21,77	20,59	20,43	20,93
260	2550,6	23,70	22,31	22,23	22,75

Fuente: [Autores]

3.1.4. Modelo simplificado, metamodelo

3.1.4.1. Introducción

La estructura tipo monopolo para telecomunicaciones se consigue simplificarla mediante hipótesis basadas en su comportamiento estático estructural, obteniendo resultados óptimos y reduciendo el tiempo de análisis.

El monopolo está compuesto por varios elementos estructurales, las juntas y las zonas de contacto deben ser analizadas para la simplificación del modelo. Las zonas anteriormente citadas son esenciales para establecer los desplazamientos obtenidos después de la aplicación de una carga.

Una vez examinados los resultados del ensayo de elementos finitos se observó que el comportamiento de la estructura, es característico para cada uno de los arreglos, figura 27,

el comportamiento tiene gran relación y depende de la geometría, sección y longitud de los elementos constitutivos de esta, es necesario determinar la inercia y el área equivalente de cada elemento (sección poligonal, brida y pernos de sujeción), se determinó que los nodos del modelo simplificado se deben ubicar en las zonas donde exista cambio de sección, contacto entre elementos y aplicación de carga o condición de frontera.

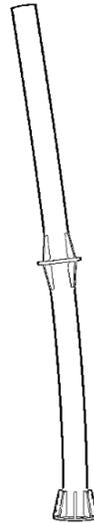


Figura 27.- Esquemización del modo de deformación de la estructura modelado en elementos finitos. [Autores]

3.1.4.2. Inferencias para el metamodelo

El metamodelo debe ser capaz de reproducir los desplazamientos de los elementos que conforman la estructura tipo monopolo al aplicarse la carga del ensayo estático.

La carga aplicada deformará horizontalmente a la estructura, además de provocar la rotación sobre el eje z como se indica en la simulación por elementos finitos.

El metamodelo requiere de elementos que posean tres grados de libertad en el plano, debido a que los resultados de la simulación por elementos finitos indican que el comportamiento global de la estructura tiene influencia en el eje X, en el eje Y y alrededor del eje Z.

La esquematización de los elementos del metamodelo son de tipo frame. Es un elemento finito bidimensional con coordenadas locales y globales. Tiene módulo de elasticidad E, momento de inercia I, área de sección transversal A y longitud L. Cada elemento tiene dos nodos y está inclinado con un ángulo θ medido en sentido contrario a las agujas del reloj desde el eje X global positivo, como se muestra en Figura 28.

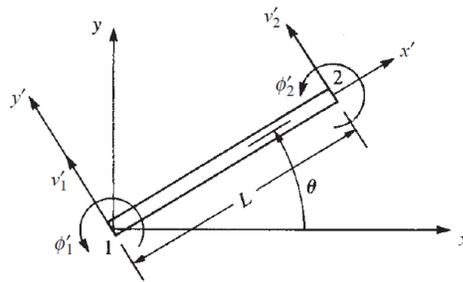


Figura 28.- Elemento frame arbitrariamente orientado [27]

Se han especificado puntos estratégicos de evaluación, donde exista contacto, cambio de sección, aplicación de carga y empotramiento.

3.1.4.3. El metamodelo

Una vez comprendido la naturaleza del ensayo estático aplicado a la estructura, nos permite detallar el metamodelo que mayor se ajuste al comportamiento real, permitiendo obtener los desplazamientos producto de su deformación. Debe ser capaz de reproducir la interacción entre los elementos constitutivos del monopolo.

Se situará una carga puntual, esta representa las cargas del viento y de accesorios utilizadas durante el ensayo, la estructura se deforma a través de los ejes eje X y Y, figura 29; por la aplicación de esta carga, las misma que se trasmite hacia los demás elementos.

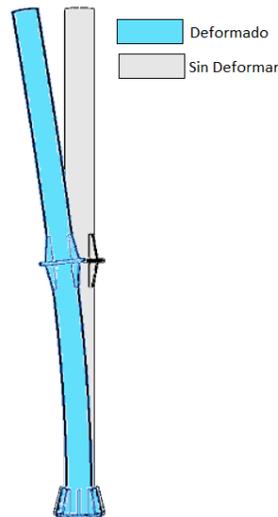


Figura 29.- Esquemización del instante inicial y final una vez desarrollado el ensayo estático. [Autores]

El modelo simplificado debe simular las deformaciones de la estructura debido a la aplicación de la carga puntual equivalente mencionada, con el fin de delimitar el

metamodelo que se muestra en la presente investigación se omite la relación respecto al tiempo debido a que el ensayo físico realizado en este trabajo es estático.

Gracias a la simulación por elementos finitos se obtuvieron 8 nodos, ubicados en los lugares donde exista cambio de sección, aplicación de una carga o discontinuidad en la estructura con el objetivo de determinar los desplazamientos en los ejes X (horizontal), Y (eje vertical), y las rotaciones respecto al eje Z, como se observa en la figura 30.

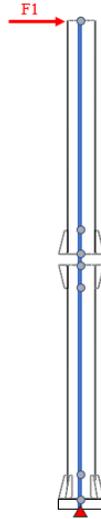


Figura 30.- Simplificación del modelo sin interacción de las juntas bridadas. [Autores]

Según [33], la interacción que tienen los pernos en las estructuras constituye un factor de gran importancia para la simplificación de un modelo de análisis. Del ensayo realizado por elementos finitos, figura 31, se determinó que en la junta bridada se presentan deformaciones de gran relevancia para el análisis de la estructura, por lo tanto, se plantea un metamodelo que relacione el comportamiento de los pernos en la junta, como se observa en la figura 32, permitiendo realizar un ensayo estático que optimiza el tiempo de simulación y disminuye el costo computacional.

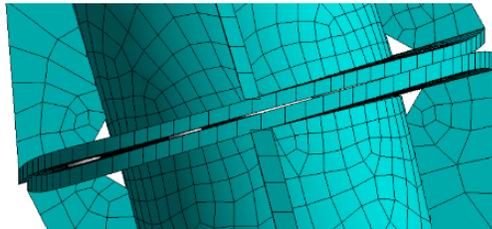


Figura 31.- Interacción existente en la junta bridada de la estructura. [Autores]

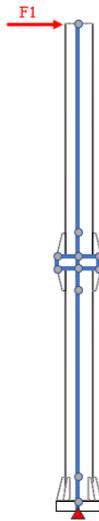


Figura 32.- Metamodelo con interacción de la junta bridada de unión apernada. [Autores]

3.1.4.4. Comprensión física de los elementos del metamodelo

El metamodelo se enfoca en emular los desplazamientos máximos, se constituye de 12 nodos y 13 elementos seleccionados de manera estratégica como se muestra en la figura 33. Para su mayor comprensión, a continuación, se detalla el comportamiento que presenta cada elemento durante el ensayo.

El elemento 1 con sus nodos 1 y 2, representa la sección 1 del prototipo; en el nodo 1 se coloca la fuerza equivalente que ejerce el viento sobre la estructura, mientras que el nodo 2 se ubica debido a existe un cambio de sección y su comportamiento es diferente. El elemento 2 con sus nodos 2 y 3, representa la sección 1 del prototipo reforzado con cartelas; el nodo 3 simboliza la unión entre la sección 1 y su brida inferior.

El elemento 3 y 4 en conjunto con los nodos 3, 4 y 5 representan la brida inferior de la sección 1, conociendo el comportamiento del nodo 3 se procede colocar los nodos 4 y 5 con el objetivo de representar el contacto entre la brida inferior de la sección 1 y los pernos de unión.

El elemento 5 con sus nodos 3 y 8, representa el comportamiento de los pernos centrales en contacto con la brida inferior de la sección 1 desde una vista bidimensional de la estructura. Los elementos 6 y 7 con sus nodos 4 y 6, 5 y 7 respectivamente, representan los pernos exteriores desde una vista bidimensional; los nodos 6 y 7 de manera similar

que los nodos 4 y 5 simulan el contacto entre la brida superior de la sección 2 y los pernos de unión.

El elemento 8 y 9 en conjunto con los nodos 6, 7 y 8 representan la brida superior de la sección 2; una vez identificado el comportamiento del nodo 6 y 7 se coloca el nodo 8 representando el contacto entre la brida superior de la sección 2 y los pernos de unión centrales de la estructura desde una vista bidimensional.

El elemento 10 con sus nodos 8 y 9, representa la sección 2 del prototipo reforzado con cartelas. El elemento 11 con los nodos 9 y 10, figura la sección 2 del prototipo. Además, el elemento 12 que posee los nodos 10 y 11, representa la sección 2 del prototipo reforzado con cartelas en la base. Los nodos 9, 10, 11 y 12 se ubican debido a existencia del cambio de sección en la estructura permitiendo un comportamiento diferente en cada elemento.

Finalmente, el elemento 13 con sus nodos 12 y 13, simula la brida base; en el nodo 13 se coloca el empotramiento que restringen todos sus grados de libertad, siendo la parte que permite el anclaje de la estructura al piso.

Una vez aplicada la carga en el nodo 1, esta se transmitió a lo largo de los demás elementos del metamodelo y se alcanzó a reproducir la interacción real de los elementos y a obtener valores de desplazamiento máximos de deformación.

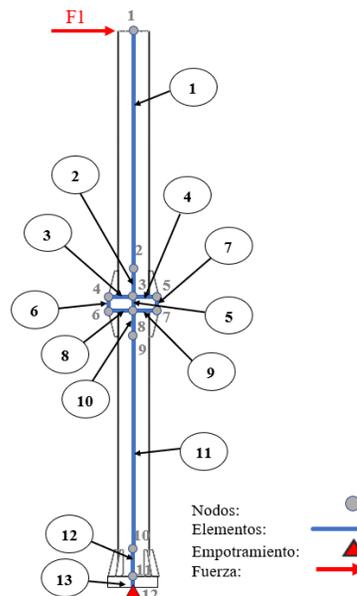


Figura 33.- Esquematización de nodos y elementos del metamodelo. [Autores]

3.1.4.5. Obtención de las ecuaciones del metamodelo

Una vez identificado los elementos y sus sectores estratégicos se obtiene un total de doce nodos, cada nodo posee tres grados de libertad, así: desplazamiento en el eje X (δ_{xi}), desplazamiento en el eje Y (δ_{yi}) y rotación sobre el eje Z (θ_i); figura 34, obteniendo así un sistema total de 12x3 grados de libertad.

La fuerza se denomina en relación al nodo de aplicación, siendo: fuerza nodal aplicada en el eje X (F_{xi}), fuerza nodal aplicada en el eje Y (F_{yi}) y momento sobre el eje Z (m_i). Cabe recalcar que la fuerza se aplica en el nodo 1 actúa a lo largo del eje X.

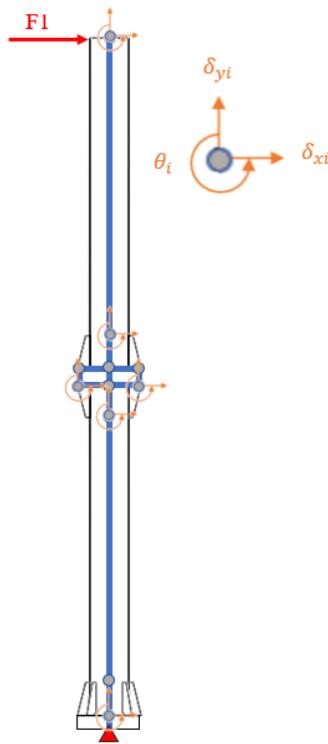


Figura 34.- Esquematación de grados de libertad por nodo del metamodelo. [Autores]

Cada elemento tiene su matriz rigidez equivalente, por ello se debe determinar cada una de ellas en relación al número de elementos como se observa en la figura 35.

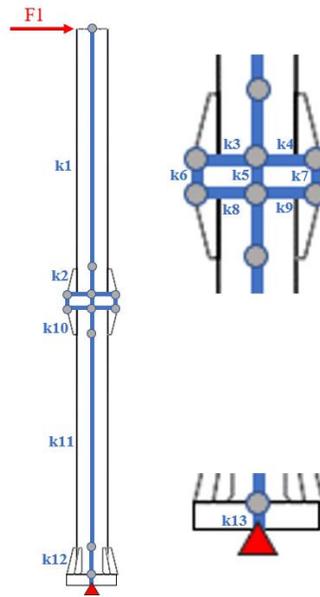


Figura 35.- Esquematización de la rigidez de cada elemento del metamodelo. [Autores]

Una vez comprendido correctamente el metamodelo, la ecuación (9) permite describir el equilibrio para la estructura relacionando la fuerza, el desplazamiento y su rigidez.

$$[F] = [K] * [\delta] \quad (9)$$

Donde:

F = Fuerza aplicada

K = Rigidez total de la estructura

δ = Desplazamiento

Anterior a la deducción de la matriz rigidez total es necesario obtener la matriz rigidez de cada elemento k_i , obteniendo la ecuación (10) que constituye el metamodelo.

$$[F] = [k_i] * [\delta] \quad (10)$$

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se procede a obtener las ecuaciones correspondientes para cada elemento.

La matriz rigidez para un elemento Plane Frame Element o elemento viga en el plano, con tres grados de libertad es:

$$[k_i] = \frac{E_i}{L_i} * \begin{bmatrix} A_i C_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} S_i^2 & \left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & -\frac{6 I_i}{L_i} S_i & -\left(A_i C_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} S_i^2 \right) & -\left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & -\frac{6 I_i}{L_i} S_i \\ \left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & A_i S_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} C_i^2 & \frac{6 I_i}{L_i} C_i & -\left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & -\left(A_i S_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} C_i^2 \right) & \frac{6 I_i}{L_i} C_i \\ -\frac{6 I_i}{L_i} S_i & \frac{6 I_i}{L_i} C_i & 4 I_i & \frac{6 I_i}{L_i} S_i & -\frac{6 I_i}{L_i} C_i & 2 I_i \\ -\left(A_i C_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} S_i^2 \right) & -\left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & \frac{6 I_i}{L_i} S_i & A_i C_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} S_i^2 & \left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & \frac{6 I_i}{L_i} S_i \\ -\left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & -\left(A_i S_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} C_i^2 \right) & -\frac{6 I_i}{L_i} C_i & \left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i & A_i S_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} C_i^2 & -\frac{6 I_i}{L_i} C_i \\ \left[\begin{array}{ccc} -\frac{6 I_i}{L_i} S_i & \frac{6 I_i}{L_i} C_i & 2 I_i \\ \frac{6 I_i}{L_i} S_i & -\frac{6 I_i}{L_i} C_i & 4 I_i \end{array} \right] \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde:

A_i = Area equivalente del elemento

I_i = Inercia del elemento

L_i = Longitud del elemento

E_i = Modulo de elasticidad del elemento

S_i = Seno del ángulo de orientación del elemento

C_i = Coseno del ángulo de orientación del elemento

Asignación de variables para la matriz rigidez para facilitar su manejo:

$$T_i = A_i C_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} S_i^2 \quad (12)$$

$$U_i = \left(A_i - \frac{12 I_i}{L_i^2} \right) C_i S_i \quad (13)$$

$$V_i = \frac{6 I_i}{L_i} S_i \quad (14)$$

$$W_i = \frac{6 I_i}{L_i} C_i \quad (15)$$

$$X_i = A_i S_i^2 + \frac{12 I_i}{L_i^2} C_i^2 \quad (16)$$

$$Y_i = 4 I_i \quad (17)$$

$$Z_i = 2 I_i \quad (18)$$

$$S_i = \frac{E_i}{L_i} \quad (19)$$

La matriz rigidez usando variables asignadas de un elemento viga bidimensional tenemos:

$$[k_i] = \begin{bmatrix} S_i T_i & S_i U_i & -S_i V_i & -S_i T_i & -S_i U_i & -S_i V_i \\ S_i U_i & S_i X_i & S_i W_i & -S_i U_i & -S_i X_i & S_i W_i \\ -S_i V_i & S_i W_i & S_i Y_i & S_i V_i & -S_i W_i & S_i Z_i \\ -S_i T_i & -S_i U_i & S_i V_i & S_i T_i & S_i U_i & S_i V_i \\ -S_i U_i & -S_i X_i & -S_i W_i & S_i U_i & S_i X_i & -S_i W_i \\ -S_i V_i & S_i W_i & S_i Z_i & S_i V_i & -S_i W_i & S_i Y_i \end{bmatrix} \quad (20)$$

La ecuación matricial de cada elemento es:

$$[F] = [k_i] * [\delta]$$

Teniendo en cuenta esto, desarrollaremos la ecuación matricial para cada elemento siendo i el número de elemento analizado:

Elemento 1:

Matriz rigidez del elemento 1:

$$[k_1] = \begin{bmatrix} S_1 T_1 & S_1 U_1 & -S_1 V_1 & -S_1 T_1 & -S_1 U_1 & -S_1 V_1 \\ S_1 U_1 & S_1 X_1 & S_1 W_1 & -S_1 U_1 & -S_1 X_1 & S_1 W_1 \\ -S_1 V_1 & S_1 W_1 & S_1 Y_1 & S_1 V_1 & -S_1 W_1 & S_1 Z_1 \\ -S_1 T_1 & -S_1 U_1 & S_1 V_1 & S_1 T_1 & S_1 U_1 & S_1 V_1 \\ -S_1 U_1 & -S_1 X_1 & -S_1 W_1 & S_1 U_1 & S_1 X_1 & -S_1 W_1 \\ -S_1 V_1 & S_1 W_1 & S_1 Z_1 & S_1 V_1 & -S_1 W_1 & S_1 Y_1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Identificando la ubicación y los respectivos nodos de cada elemento esquematizado en el metamodelo, determinamos sus respectivas ecuaciones matriciales constitutivas.

Ecuación matricial constitutiva del elemento 1:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ m_1 \\ F_{x2} \\ F_{y2} \\ m_2 \end{bmatrix} = [k_1] * \begin{bmatrix} \delta_{x1} \\ \delta_{y1} \\ \theta_1 \\ \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Sabiendo que el proceso es repetitivo para los demás elementos, se tiene:

Ecuación matricial constitutiva del elemento 2:

$$\begin{bmatrix} F_{x2} \\ F_{y2} \\ m_2 \\ F_{x3} \\ F_{y3} \\ m_3 \end{bmatrix} = [k_2] * \begin{bmatrix} \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \theta_2 \\ \delta_{x3} \\ \delta_{y3} \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 3:

$$\begin{bmatrix} F_{x3} \\ F_{y3} \\ m_3 \\ F_{x4} \\ F_{y4} \\ m_4 \end{bmatrix} = [k_3] * \begin{bmatrix} \delta_{x3} \\ \delta_{y3} \\ \theta_3 \\ \delta_{x4} \\ \delta_{y4} \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 4:

$$\begin{bmatrix} F_{x3} \\ F_{y3} \\ m_3 \\ F_{x5} \\ F_{y5} \\ m_5 \end{bmatrix} = [k_4] * \begin{bmatrix} \delta_{x3} \\ \delta_{y3} \\ \theta_3 \\ \delta_{x5} \\ \delta_{y5} \\ \theta_5 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 5:

$$\begin{bmatrix} F_{x3} \\ F_{y3} \\ m_3 \\ F_{x8} \\ F_{y8} \\ m_8 \end{bmatrix} = [k_5] * \begin{bmatrix} \delta_{x3} \\ \delta_{y3} \\ \theta_3 \\ \delta_{x8} \\ \delta_{y8} \\ \theta_8 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 6:

$$\begin{bmatrix} F_{x4} \\ F_{y4} \\ m_4 \\ F_{x6} \\ F_{y6} \\ m_6 \end{bmatrix} = [k_6] * \begin{bmatrix} \delta_{x4} \\ \delta_{y4} \\ \theta_4 \\ \delta_{x6} \\ \delta_{y6} \\ \theta_6 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 7:

$$\begin{bmatrix} F_{x5} \\ F_{y5} \\ m_5 \\ F_{x7} \\ F_{y7} \\ m_7 \end{bmatrix} = [k_7] * \begin{bmatrix} \delta_{x5} \\ \delta_{y5} \\ \theta_5 \\ \delta_{x7} \\ \delta_{y7} \\ \theta_7 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 8:

$$\begin{bmatrix} F_{x6} \\ F_{y6} \\ m_6 \\ F_{x8} \\ F_{y8} \\ m_8 \end{bmatrix} = [k_8] * \begin{bmatrix} \delta_{x6} \\ \delta_{y6} \\ \theta_6 \\ \delta_{x8} \\ \delta_{y8} \\ \theta_8 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 9:

$$\begin{bmatrix} F_{x7} \\ F_{y7} \\ m_7 \\ F_{x8} \\ F_{y8} \\ m_8 \end{bmatrix} = [k_9] * \begin{bmatrix} \delta_{x7} \\ \delta_{y7} \\ \theta_7 \\ \delta_{x8} \\ \delta_{y8} \\ \theta_8 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 10:

$$\begin{bmatrix} F_{x8} \\ F_{y8} \\ m_8 \\ F_{x9} \\ F_{y9} \\ m_9 \end{bmatrix} = [k_{10}] * \begin{bmatrix} \delta_{x8} \\ \delta_{y8} \\ \theta_8 \\ \delta_{x9} \\ \delta_{y9} \\ \theta_9 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 11:

$$\begin{bmatrix} F_{x9} \\ F_{y9} \\ m_9 \\ F_{x10} \\ F_{y10} \\ m_{10} \end{bmatrix} = [k_{11}] * \begin{bmatrix} \delta_{x9} \\ \delta_{y9} \\ \theta_9 \\ \delta_{x10} \\ \delta_{y10} \\ \theta_{10} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 12:

$$\begin{bmatrix} F_{x10} \\ F_{y10} \\ m_{10} \\ F_{x11} \\ F_{y11} \\ m_{11} \end{bmatrix} = [k_{12}] * \begin{bmatrix} \delta_{x10} \\ \delta_{y10} \\ \theta_{10} \\ \delta_{x11} \\ \delta_{y11} \\ \theta_{11} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Ecuación matricial constitutiva del elemento 13:

$$\begin{bmatrix} F_{x11} \\ F_{y11} \\ m_{11} \\ F_{x12} \\ F_{y12} \\ m_{12} \end{bmatrix} = [k_{13}] * \begin{bmatrix} \delta_{x11} \\ \delta_{y11} \\ \theta_{11} \\ \delta_{x12} \\ \delta_{y12} \\ \theta_{12} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Una vez determinadas todas las ecuaciones constitutivas de los elementos, se determina la ecuación matricial global del modelo equivalente simplificado que por su magnitud se presenta en el ANEXO 6. Para su respectiva solución es necesario la utilización de un software de procesamiento matricial, permitiendo el cálculo rápido de los desplazamientos de acuerdo a las necesidades de evaluación requeridas por el modelo.

3.1.4.6. Obtención de los parámetros E, L, A e I equivalentes

El módulo estático depende del tipo de material utilizado en la construcción de la estructura, siendo estos aceros ASTM A36, ASTM A500 y pernos tipo ASTM A325. El valor de E_i para las secciones, bridas y pernos es de $200000 \frac{N}{mm^2}$

La longitud equivalente de cada elemento es igual a su respectiva medida real y se mantiene constante durante el análisis excepto para los elementos que identifican las bridas (elementos 3,4 ,7 y 8) y los pernos (elementos 5, 6 y 7). Los elementos que reemplazan a las bridas cambian su longitud en relación al diámetro de la misma, sin embargo, para los pernos se obtiene su longitud equivalente a partir de ensayos experimentales realizados con ayuda del software de elementos finitos, permitiendo obtener la relación entre la longitud equivalente y el espesor en función el número de pernos. Esto se realizó con la finalidad de expresar la no linealidad existente en el tipo de estructura estudiada en esta investigación.

El área equivalente A_i y la inercia equivalente I_i de las secciones se mantienen durante el análisis, sin embargo, las bridas (elementos 3,4 ,7 y 8) y los pernos (elementos 5, 6 y 7) presentan cambios en relación a la variación de espesor de cada la junta y al número de pernos que presenta la misma. La tabla 26 presenta los valores de los parámetros E_i , L_i , A_i y I_i equivalente de cada uno de los elementos del metamodelo.

Tabla 26.- Parámetros E, L, A e I equivalente de los elementos del metamodelo

Elemento	Material	Modulo elástico E_i	Longitud equivalente L_i	Área equivalente A_i	Inercia Equivalente I_i
1	ASTM A500	$200000 \frac{N}{mm^2}$	900 mm	1226,48 mm ²	1462844,57 mm ⁴
2	ASTM A500	$200000 \frac{N}{mm^2}$	100 mm	1667,94 mm ²	2047982,40 mm ⁴
3	ASTM A36	$200000 \frac{N}{mm^2}$	70 mm	93,04 mm ²	688,85 mm ⁴
4	ASTM A36	$200000 \frac{N}{mm^2}$	70 mm	93,04 mm ²	688,85 mm ⁴
5	ASTM A325	$200000 \frac{N}{mm^2}$	46,78 mm	3954,73 mm ²	1244584,32 mm ⁴
6	ASTM A325	$200000 \frac{N}{mm^2}$	46,78 mm	126,68 mm ²	1276,98 mm ⁴
7	ASTM A325	$200000 \frac{N}{mm^2}$	46,78 mm	126,68 mm ²	1276,98 mm ⁴
8	ASTM A36	$200000 \frac{N}{mm^2}$	70 mm	65,26 mm ²	338,93 mm ⁴
9	ASTM A36	$200000 \frac{N}{mm^2}$	70 mm	65,26 mm ²	338,93 mm ⁴
10	ASTM A500	$200000 \frac{N}{mm^2}$	100 mm	1667,94 mm ²	2047982,40 mm ⁴
11	ASTM A500	$200000 \frac{N}{mm^2}$	800 mm	1226,48 mm ²	1462844,57 mm ⁴
12	ASTM A500	$200000 \frac{N}{mm^2}$	100 mm	2087,70 mm ²	2633120,22 mm ⁴
13	ASTM A36	$200000 \frac{N}{mm^2}$	10 mm	23219,01 mm ²	42914389,96 mm ⁴

Fuente: [Autores]

Para mayor detalle del proceso de obtención de los parámetros establecidos en la tabla 19, revise el ANEXO 7.

3.1.4.7. Resultados de metamodelo

3.1.4.7.1. Resultados de metamodelo del prototipo

Una vez identificados los parámetros necesarios para la simplificación del análisis, con la ayuda de una herramienta computacional de procesamiento matricial se obtuvo los resultados en los puntos detallados en la tabla 27.

Tabla 27.- Metamodelo de simulación del prototipo

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MS -01	Monopolo:	Prototipo
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	2533.4 N	Circular hueca	3 seg
Software utilizado:	Software de procesamiento matricial		
N° de nodos:	12	N° de elementos:	13
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS			
Nodo	Desplazamiento eje X [mm]	Desplazamiento eje Y [mm]	Rotación [rad]
1	22,6384	-4,02E-15	-1,68E-02
2	8,5729	-1,44E-15	-1,33E-02
3	7,2732	-1,20E-15	-1,27E-02
4	7,2732	8,77E-01	-1,25E-02
5	7,2732	-8,77E-01	-1,25E-02
6	6,6866	8,77E-01	-1,26E-02
7	6,6866	-8,77E-01	-1,26E-02
8	6,6866	-1,10E-15	-1,24E-02
9	5,4825	-8,87E-16	-1,17E-02
10	4,85E-02	-6,75E-19	-9,62E-04
11	3,00E-07	6,78E-22	-6,00E-08
12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Fuente: [Autores]

Resumiendo, los resultados anteriores a los puntos de interés identificados en la estructura, se obtiene la tabla 28:

Tabla 28.- Desplazamientos mediante el metamodelo en los puntos específicos del prototipo

Descripción	Desplazamiento máximo eje X [mm]
Total	22,6384
Brida 1 inf	7,2732
Brida 2 sup	6,6866
Base	0

Fuente: [Autores]

A continuación, en la tabla 29 se presenta los resultados obtenidos mediante el metamodelo de simulación al variar la fuerza de aplicación en el análisis:

Tabla 29.- Resultados de desplazamiento en relación a la fuerza aplicada del modelo simplificado

Fuerza		Desplazamiento eje X
[Kg]	[N]	[mm]
20	196,2	1,7422
40	392,4	3,4844
60	588,6	5,2266
80	784,8	6,9688
100	981	8,7110
120	1177,2	10,4532
140	1373,4	12,1954
160	1569,6	13,9376
180	1765,8	15,6798
200	1962	17,4220
220	2158,2	19,1643
240	2354,4	20,9075
258,25	2533,4	22,4959
260	2550,6	22,6487

Fuente: [Autores]

3.1.4.7.2. Resultados de metamodelo del modelo real

Utilizando la metodología aplicada en el diseño del metamodelo del prototipo, se procede a determinar los parámetros constitutivos que permitan desarrollar el modelo simplificado de simulación para estructuras de 6 secciones, mediante ensayos experimentales con la ayuda de software de elementos finitos con elementos tipo Shell, estos resultados se detallan en el ANEXO 8.

Una vez identificados los parámetros necesarios para la simplificación del análisis y con la ayuda de una herramienta computacional de procesamiento matricial se obtuvo los resultados de desplazamiento, como se detalla en la tabla 30:

Tabla 30.- Consideraciones de análisis para el metamodelo

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 			
N° de Simulación:	MS-02	Monopolo:	Prototipo
Normativa:	ACSE 48-11 / ANSI TIA 222-G		
Características de la simulación:	Fuerza de viento equivalente:	Geometría:	Tiempo de procesamiento:
	10000 N	Circular hueca	3 seg
Software utilizado:	Software de procesamiento matricial		
N° de nodos:	52	N° de elementos:	53
Características del ordenador:	Asus i7-7700 2.8 GHz	16 GB RAM	8 núcleos
Realizado por:	Lagos Christian	Revisado por:	Ing. Arroba César
	Sánchez Johnny	Fecha:	29/03/2019
RESULTADOS			
Descripción		Desplazamiento máximo eje X [mm]	
Total		425,93	
Brida 1 inf		290,32	
Brida 2 sup		286,08	
Brida 2 inf		173,43	
Brida 3 sup		170,10	
Brida 3 inf		90,27	
Brida 4 sup		88,09	
Brida 4 inf		37,42	
Brida 5 sup		36,01	
Brida 5 inf		8,58	
Brida 6 sup		7,98	
Brida 6 inf		0,00	

Fuente: [Autores]

3.1.5. Comparación de resultados

3.1.5.1. Prototipo

A continuación, en la tabla 31 se presenta los desplazamientos máximos presentes en el prototipo, obtenidos mediante ensayo físico, análisis por elementos finitos y el modelo simplificado de simulación y sus respectivos porcentajes de variación de resultados. Cabe mencionar que para los análisis MEF el desplazamiento máximo se produce en el eje Z, sin embargo, la configuración del ensayo físico y metamodelo generan el desplazamiento máximo en el eje X

Tabla 31.- Resultados de desplazamiento máximo del prototipo

N°	Fuerza		Desplazamiento máximo [mm]			
	[Kg]	[N]	Ensayo Físico	MEF Sólido	MEF Shell	Metamodelo
1	20	196,2	1,6520	1,7053	1,7415	1,7422
2	40	392,4	3,2300	3,4105	3,4830	3,4844
3	60	588,6	4,9533	5,1158	5,2246	5,2266
4	80	784,8	6,5500	6,8210	6,9661	6,9688
5	100	981,0	8,3067	8,5263	8,7076	8,7110
6	120	1177,2	10,0733	10,2320	10,4490	10,4532
7	140	1373,4	12,1800	11,9370	12,1910	12,1954
8	160	1569,6	13,6500	13,6420	13,9320	13,9376
9	180	1765,8	15,5667	15,3470	15,6740	15,6798
10	200	1962,0	17,1267	17,0530	17,4150	17,4220
11	220	2158,2	19,1233	18,7580	19,1570	19,1643
12	240	2354,4	20,9300	20,4630	20,8980	20,9075
13	258,25	2533,4	22,5900	22,0190	22,4870	22,4959
14	260	2550,6	22,7467	22,1630	22,6400	22,6487

Fuente: [Autores]

En la figura 36 se puede apreciar la comparación de resultados de forma gráfica entre el ensayo físico, los ensayos por elementos finitos tanto con elementos sólidos y con elementos shell y el metamodelo de simulación, presentando una tendencia creciente directamente proporcional a la fuerza aplicada en cada caso de análisis.

Como se puede observar la variación de resultados presentes en la tabla 32, muestra una variación máxima de 5.59%, 7.83% y 7.88% entre el ensayo físico y los ensayos por elementos finitos con elementos sólidos, elementos Shell y el metamodelo de simulación respectivamente, por lo tanto, utilizando el criterio de aceptación que no supere el 10% de variación en resultados, se concluye que estos son aceptados y validados.

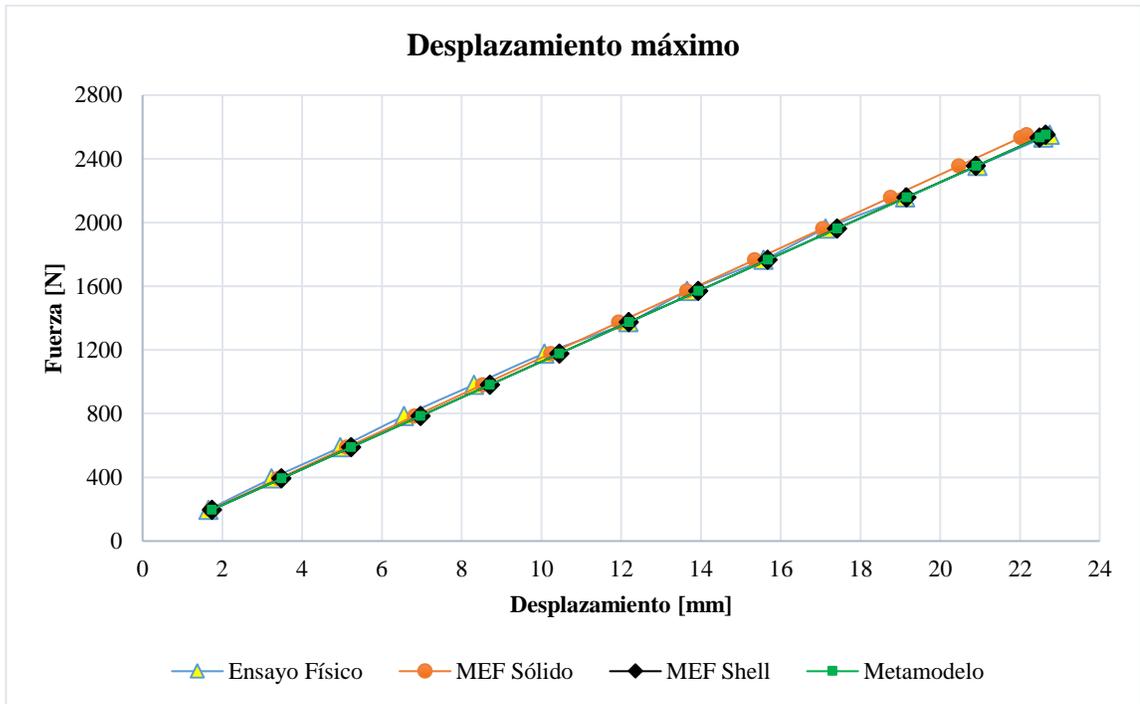


Figura 36.- Desplazamiento máximo del prototipo. [Autores]

Tabla 32.- Porcentaje de variación de resultados entre el ensayo físico y los análisis realizados en el prototipo

N°	% variación de resultados		
	Ensayo Físico MEF Sólido	Ensayo Físico MEF Shell	Ensayo Físico Metamodelo
1	3,23%	5,42%	5,46%
2	5,59%	7,83%	7,88%
3	3,28%	5,48%	5,52%
4	4,14%	6,35%	6,39%
5	2,64%	4,83%	4,87%
6	1,58%	3,73%	3,77%
7	2,00%	0,09%	0,13%
8	0,06%	2,07%	2,11%
9	1,41%	0,69%	0,73%
10	0,43%	1,68%	1,72%
11	1,91%	0,18%	0,21%
12	2,23%	0,15%	0,11%
13	2,53%	0,46%	0,42%
14	2,57%	0,47%	0,43%

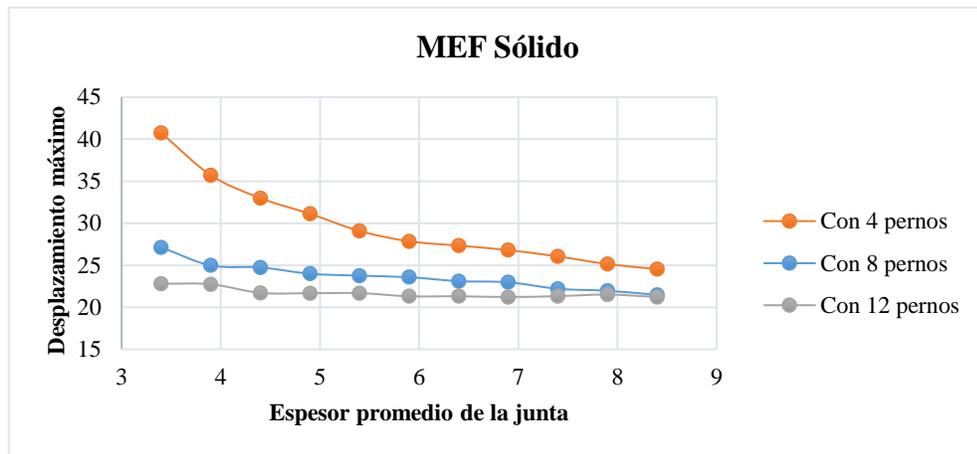
Fuente: [Autores]

Con el propósito de validar los resultados de los análisis realizados, se propone casos de estudio al variar el número de pernos y los espesores de bridas de la junta, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 33, y representados gráficamente en las figuras 37 y 38.

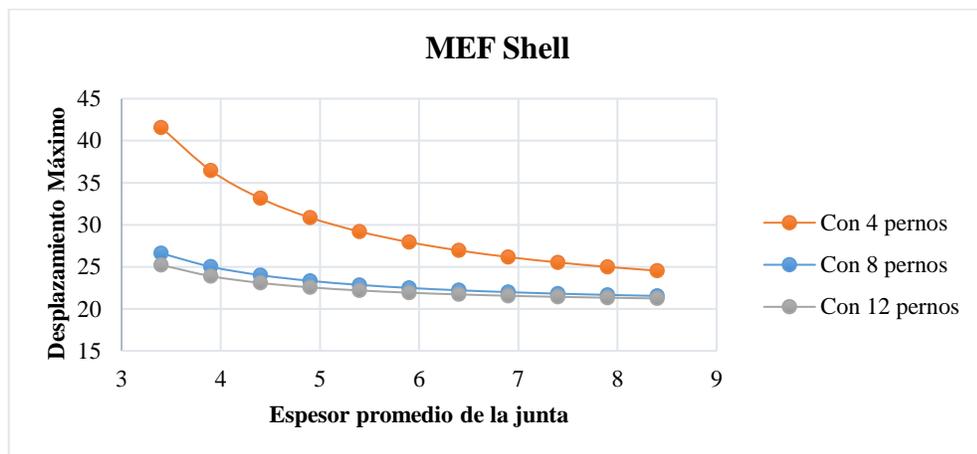
Tabla 33.- Desplazamiento máximo del prototipo en función del número de pernos y el espesor de la junta.

Número de pernos	Espesor de brida [mm]		Desplazamiento máximo [mm]		
	Brida 1 inf	Brida 2 sup	MEF Sólido	MEF Shell	Metamodelo
4	3	3,8	40,7479	41,5754	41,1663
	3,5	4,3	35,7080	36,4560	35,9095
	4	4,8	32,9818	33,1478	32,1756
	4,5	5,3	31,1149	30,8583	29,4791
	5	5,8	29,0747	29,1918	27,5048
	5,5	6,3	27,8427	27,9312	26,0430
	6	6,8	27,3289	26,9481	24,9510
	6,5	7,3	26,7972	26,1623	24,1293
	7	7,8	26,0430	25,5212	23,5076
	7,5	8,3	25,1386	24,9893	23,0349
	8	8,8	24,5435	24,5416	22,6744
8	3	3,8	27,1254	26,6089	29,0091
	3,5	4,3	24,9796	25,0108	26,7306
	4	4,8	24,7401	24,0082	25,1698
	4,5	5,3	23,9860	23,3313	24,0876
	5	5,8	23,7553	22,8479	23,3304
	5,5	6,3	23,5704	22,4871	22,7971
	6	6,8	23,1101	22,2082	22,4196
	6,5	7,3	22,9697	21,9865	22,1514
	7	7,8	22,1927	21,8063	21,9604
	7,5	8,3	21,9601	21,6571	21,8241
	8	8,8	21,4681	21,5318	21,7268
12	3	3,8	22,8019	25,2202	22,2894
	3,5	4,3	22,7366	23,8918	21,9133
	4	4,8	21,7107	23,0856	21,7128
	4,5	5,3	21,6716	22,5566	21,6056
	5	5,8	21,6760	22,1879	21,5480
	5,5	6,3	21,3074	21,9186	21,5172
	6	6,8	21,3073	21,7145	21,5037
	6,5	7,3	21,2167	21,5549	21,4933
	7	7,8	21,3221	21,4272	21,4878
	7,5	8,3	21,5067	21,3229	21,4848
	8	8,8	21,2204	21,2362	21,4832

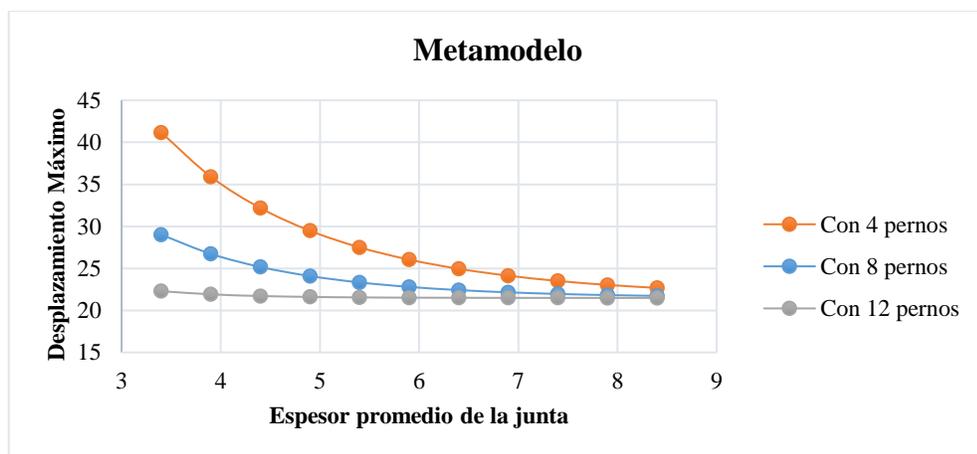
Fuente: [Autores]



a)

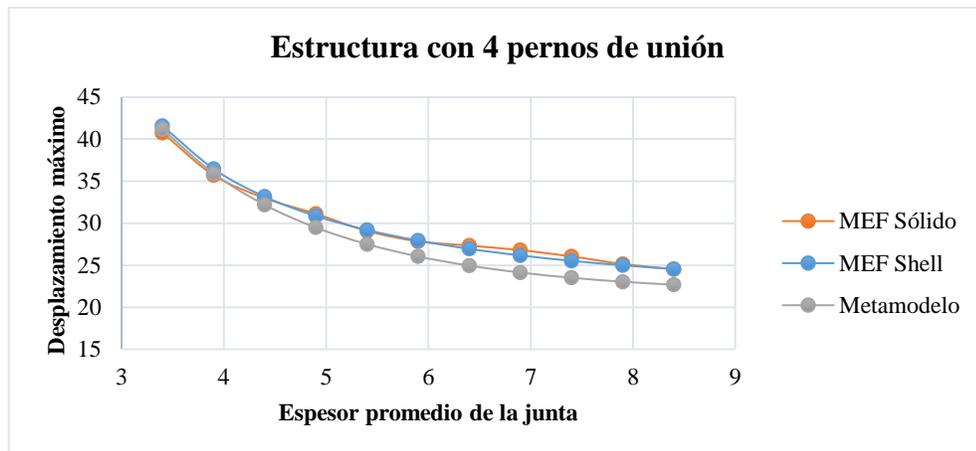


b)

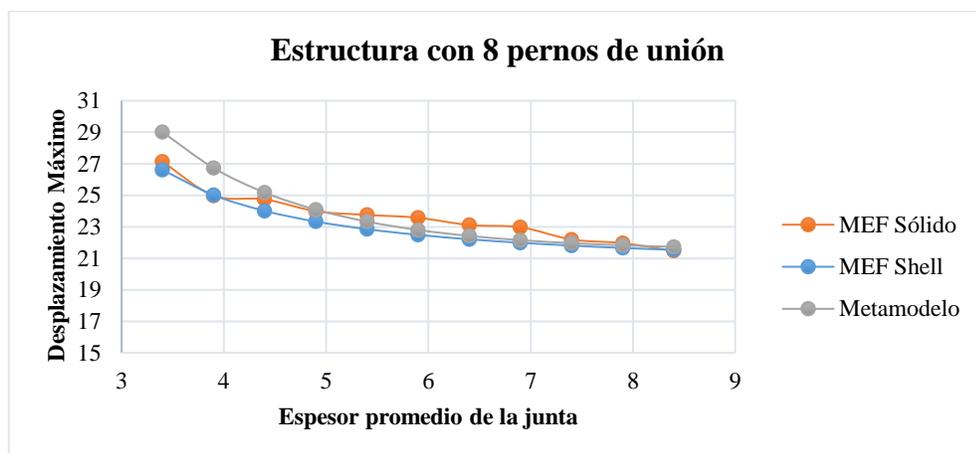


c)

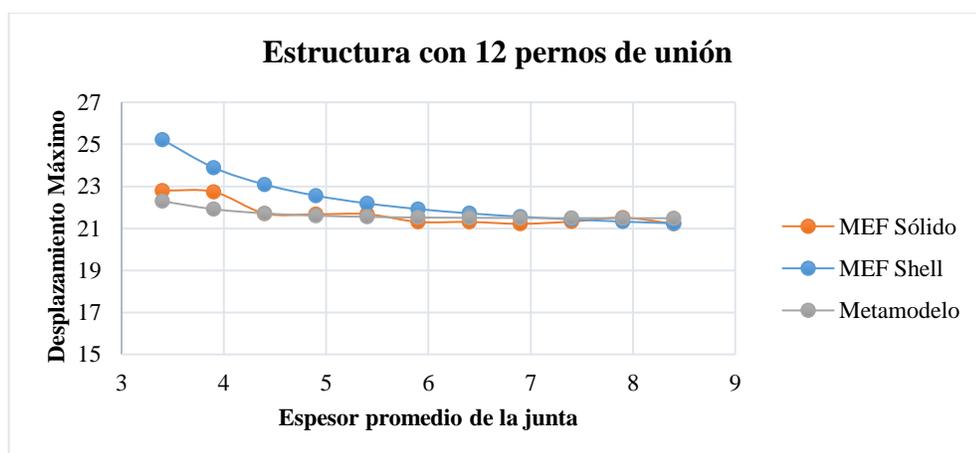
Figura 37.- Curvas de desplazamiento máximo en relación al número de pernos y el tipo de análisis: a) MEF con elementos sólidos, b) MEF con elementos Shell y c) Metamodelo de simulación. [Autores]



a)



b)



c)

Figura 38.- Curvas de desplazamiento máximo en relación al tipo de análisis y el número de pernos utilizados en la estructura: a) 4 pernos, b) 8 pernos y c) 12 pernos. [Autores]

Al revisar los resultados obtenidos de los análisis MEF con elementos sólidos y elementos shell respectivamente, se observa que a medida que incrementamos el número de pernos el desplazamiento máximo de la estructura disminuye. Del mismo modo, al disminuir el espesor incrementa el desplazamiento máximo, es por ello que se ha establecido relaciones matemáticas para poder simular este comportamiento mediante el metamodelo de simulación propuesto en este documento.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos entre los análisis, se concluye que el comportamiento adopta una tendencia lineal a medida que se utiliza un mayor número de pernos.

3.1.5.2. Modelo real

Con el propósito de validar el metamodelo de simulación, se realiza la comparación de resultados entre los análisis MEF con elementos tipo sólido, análisis MEF con elementos tipo shell y el metamodelo de simulación como se detalla en la tabla 34. Donde se verifica que el porcentaje de variación máximo entre el análisis MEF Sólido y MEF Shell; MEF Sólido y Metamodelo son 5,6 % y 9,2 % respectivamente. Del mismo modo que para el prototipo, los análisis MEF produce un desplazamiento máximo en el eje Z, sin embargo, la configuración del metamodelo genera el desplazamiento máximo en el eje X

Tabla 34.- Comparación de resultados de desplazamiento de bridas según el tipo de análisis.

Descripción	Desplazamiento máximo [mm]			Porcentaje de variación	
	MEF Sólido	MEF Shell	Metamodelo	MEF Sólido y MEF Shell	MEF Sólido y Metamodelo
Total	398,45	420,60	425,93	5,6%	6,9%
Brida 1 inf	268,63	282,98	290,32	5,3%	8,1%
Brida 2 sup	268,03	282,77	286,08	5,5%	6,7%
Brida 2 inf	159,96	168,09	173,43	5,1%	8,4%
Brida 3 sup	159,34	167,94	170,10	5,4%	6,8%
Brida 3 inf	82,65	86,05	90,27	4,1%	9,2%
Brida 4 sup	82,25	85,95	88,09	4,5%	7,1%
Brida 4 inf	34,28	35,17	37,42	2,6%	9,2%
Brida 5 sup	33,96	35,11	36,01	3,4%	6,0%
Brida 5 inf	7,89	7,52	8,58	4,7%	8,7%
Brida 6 sup	7,73	7,48	7,98	3,2%	3,2%
Brida 6 inf	0,02	0,02	0,00	0,0%	0,0%

Fuente: [Autores]

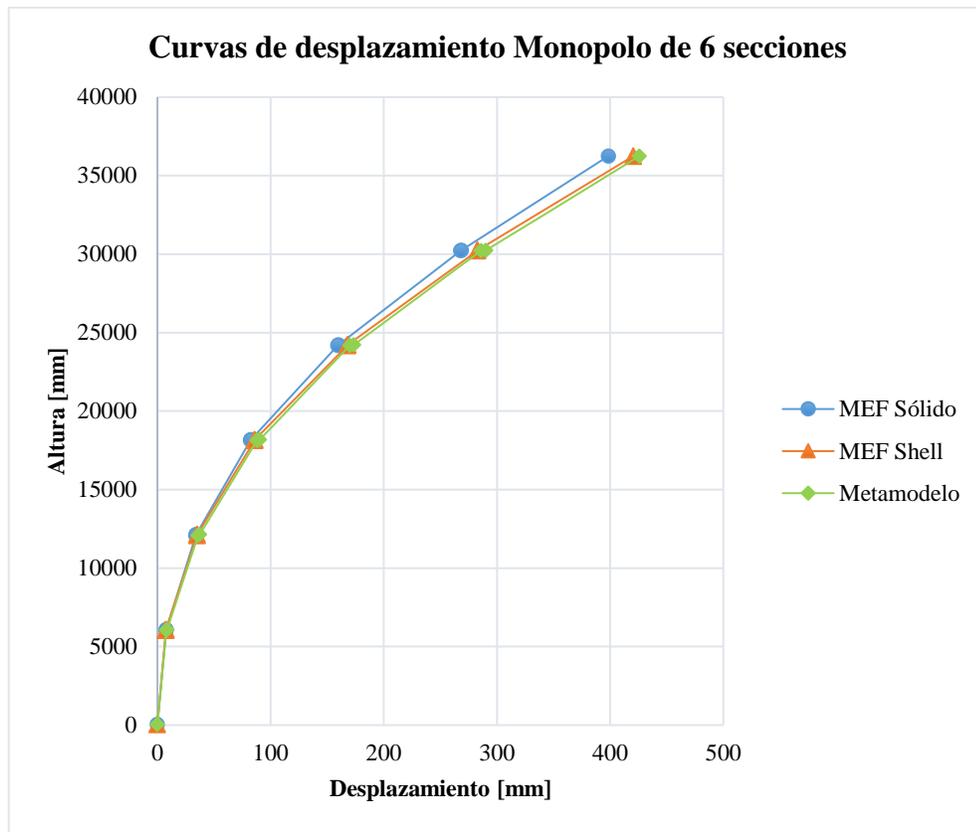


Figura 39.-Curvas de desplazamiento - altura en relación al tipo de análisis. [Autores]

Al observar las curvas de desplazamiento detalladas en la figura 39 se puede concluir que el comportamiento entre los análisis MEF Sólido, MEF Shell y Metamodelo de simulación, son semejantes, por otra parte, los tiempos de simulación de los análisis MEF Sólido, MEF Shell y Metamodelo son 248 min, 3 min y 3 seg respectivamente, logrando optimizar el análisis del diseño de estructuras tipo monopolo.

3.1.6. Optimización

Para realizar la optimización de las juntas bridas se realizó un análisis experimental mediante software de elementos finitos determinando los parámetros detallados en la tabla 35. Por otra parte, en ausencia de un marco regulatorio específico se permite optar por criterios presentes en [34], apartado J8, que recomienda utilizar un valor de resistencia de aplastamiento admisible para bases de columnas con un factor de seguridad de 2,31 según el método (ASD), en nuestro trabajo se opta por un diseño más conservador asumiendo un factor de seguridad mínimo de 2,5.

Tabla 35.- Análisis de optimización de diseño para el modelo real

N. PERNOS	8			16			24		
JUNTA	Espesor [mm]	Masa [Kg]	Factor Segur.	Espesor [mm]	Masa [Kg]	Factor Segur.	Espesor [mm]	Masa [Kg]	Factor Segur.
JUNTA 1	20	49,336	2,7	15	36,733	3,18	10	24,310	2,51
JUNTA 2	30	95,765	2,79	20	63,485	2,85	15	47,345	2,82
JUNTA 3	35	140,127	2,8	25	99,481	3,24	20	79,097	3,68
JUNTA 4	40	196,568	3,1	25	122,245	2,59	20	97,308	2,97
JUNTA 5	40	236,395	2,65	30	176,340	3,32	20	116,923	2,58

Fuente: [Autores]

Al revisar los resultados obtenidos, se determina que la configuración más óptima en cada junta requiere de la utilización de un mayor número de pernos, debido a que este influye inversamente sobre el espesor de bridas y la masa de la junta. Por lo tanto, es necesario utilizar bridas con 24 pernos y espesores de 10, 15, 20, 20 y 20 mm para las juntas 1, 2, 3 4 y 5 respectivamente. Para mayor detalle de los casos de optimización estudiados en las juntas revise el ANEXO 9.

3.2. Verificación de hipótesis

Para la verificación de hipótesis se realizará la comparación de los resultados obtenidos en la optimización de las juntas y evaluando que las juntas de la estructura cumplan con las especificaciones de factor de seguridad y masa como se muestra en la tabla 36.

Tabla 36.- Comparación de resultados entre las conexiones apernadas el modelo real y su optimización

Junta	Brida	REAL				OPTIMIZADA			
		Espesor [mm]	Masa [Kg]	Esfuerzo [MPa]	Factor Seguridad	Espesor [mm]	Masa [Kg]	Esfuerzo [MPa]	Factor Seguridad
Junta 1	Superior	15	36.73	78.65	3.18	10	24.31	99.67	2.51
	Inferior	15	36.73	76.70	3.26	10	24.31	95.70	2.61
Junta 2	Superior	20	63.48	87.72	2.85	15	47.34	88.52	2.82
	Inferior	20	63.48	82.52	3.03	15	47.34	89.66	2.79
Junta 3	Superior	20	79.58	123.90	2.02	20	79.10	67.99	3.68
	Inferior	20	79.58	106.33	2.35	20	79.10	65.76	3.80
Junta 4	Superior	25	122.24	96.42	2.59	20	97.31	84.23	2.97
	Inferior	25	122.24	86.25	2.90	20	97.31	81.11	3.08
Junta 5	Superior	25	146.95	114.98	2.17	20	116.92	97.05	2.58
	Inferior	25	146.95	98.52	2.54	20	116.92	87.15	2.87

Fuente: [Autores]

La tabla 37 muestra la variación de la reducción de masa entre el modelo ensayado y el modelo propuesto para la optimización de las juntas de la estructura tipo monopolo.

Tabla 37.- Análisis de la variación de masa de las juntas optimizadas

Junta	Brida	Masa de las analizadas [kg]	Masa de las juntas optimizadas [kg]	% de reducción de masa	Optimiza la junta
Junta 1	Superior	36.73	24.31	33.8%	SI
	Inferior	36.73	24.31	33.8%	SI
Junta 2	Superior	63.48	47.34	25.4%	SI
	Inferior	63.48	47.34	25.4%	SI
Junta 3	Superior	79.58	79.10	0.6%	SI
	Inferior	79.58	79.10	0.6%	SI
Junta 4	Superior	122.24	97.31	20.4%	SI
	Inferior	122.24	97.31	20.4%	SI
Junta 5	Superior	146.95	116.92	20.4%	SI
	Inferior	146.95	116.92	20.4%	SI

Fuente: [Autores]

En la tabla 38 se muestra la comparación del factor de seguridad de las juntas analizadas y las juntas optimizadas, evaluando que cumpla con un valor de factor de seguridad mayor o igual a 2.5 para un diseño conservador.

Tabla 38.- Comparación del factor de seguridad de las juntas optimizadas del monopolo

Junta	Brida	F. Seguridad junta optimizada	F. Seguridad ≥ 2.5
Junta 1	Superior	2.51	SI
	Inferior	2.61	SI
Junta 2	Superior	2.82	SI
	Inferior	2.79	SI
Junta 3	Superior	3.68	SI
	Inferior	3.80	SI
Junta 4	Superior	2.97	SI
	Inferior	3.08	SI
Junta 5	Superior	2.58	SI
	Inferior	2.87	SI

Fuente: [Autores]

Según lo expuesto en la tabla 37 y tabla 38 se acepta la hipótesis, luego de analizar los resultados obtenidos del análisis de las juntas optimizadas se verifico que, al realizar varios análisis de modelos geométricos de estructuras tipo monopolo, se logró obtener mayor eficiencia y desempeño las juntas bridadas al reducir su masa hasta en un 33.8 % y obtener un factor de seguridad mínimo de 2,51.

CAPITULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Mediante el estudio teórico-técnico realizado a las estructuras tipo monopolo, se determinó que su configuración consta de elementos metálicos, de secciones poligonales con bridas circulares en los extremos de cada sección que facilitan el montaje, mediante pernos de alta resistencia. Es de gran importancia el uso de cartelas de refuerzo para aumentar la resistencia de la conexión entre las bridas circulares y la sección poligonal evitando concentraciones de esfuerzos. En este trabajo se analiza un monopolo de ocho lados y 36 metros de altura que representa el caso más crítico de estructuras tipo monopolo instaladas en el país.
- Una torre tipo monopolo se expone a diversas condiciones ambientales dependiendo del lugar de instalación requiriendo de un estudio previo que permita determinar los factores esenciales para su diseño. Estas estructuras son ligeras, por lo que en su diseño influye mucho los esfuerzos que genera el viento siendo este el enfoque principal del presente trabajo de investigación. Debido a su peso relativamente bajo, los sismos o movimientos telúricos no afectan significativamente en este tipo de estructuras.
- Mediante análisis por elementos finitos se identifica que el comportamiento a flexión de las estructuras tipo monopolo presenta una tendencia creciente tanto en desplazamiento como en esfuerzos máximos, es decir, a mayor altura mayor serán los valores de desplazamiento y esfuerzos.
- Mediante el análisis de variación de resultados para los resultados de desplazamiento y esfuerzos máximos entre simulaciones con elementos sólidos y elementos Shell, nos permite validar la metodología aplicada en el análisis de elementos finitos permitiendo la reducción del tiempo de análisis y su gasto computacional.
- Mediante la utilización de un prototipo se validó los resultados obtenidos en las simulaciones por elementos finitos, obteniendo variaciones máximas de 5.59%, 7.83% y 7.88% entre el ensayo físico y los ensayos por elementos finitos con elementos sólidos, elementos Shell y el metamodelo de simulación respectivamente; estos resultados permiten aceptar y validar la metodología utilizada.

- Con el objetivo de reducir el tiempo de análisis de simulación se planteó el diseño de un metamodelo estableciendo relaciones matemáticas que relacionen el número de pernos y el espesor de bridas hasta llegar a la configuración más óptima que permita simular el comportamiento no lineal de este tipo de estructuras. Además, se determinó que la configuración más óptima en cada junta requiere de la utilización de un mayor número de pernos, debido a que este influye inversamente sobre el espesor de bridas y la masa de la junta.
- Al comparar los resultados obtenidos entre los análisis por elementos finitos con elementos sólidos, elementos Shell y el metamodelo de simulación, se concluye que el comportamiento del monopolo adopta una tendencia lineal a medida que se utiliza un mayor número de pernos por cada junta bridada. Con el objetivo de optimizar las juntas del monopolo de seis secciones estudiado en este trabajo es necesario utilizar bridas con 24 pernos y espesores de 10, 15, 20, 20 y 20 mm para las juntas 1, 2, 3 4 y 5 respectivamente.
- Posterior al análisis de resultados obtenidos a partir de casos de estudio realizados en este trabajo de investigación para la optimización de las juntas bridadas se verificó que se puede reducir su masa hasta en un 33.8 % y obteniendo un factor de seguridad mínimo de 2.51, minimizando el peso de la estructura y el costo de fabricación en cumplimiento con las condiciones de servicio establecidas

4.2. Recomendaciones

- Es necesario realizar más estudios de este tipo de estructuras debido a que su comportamiento es no lineal y esto dificulta la creación de modelos simplificados generales que relaciones todos los parámetros de diseño de la estructura.
- Para el análisis por elementos finitos, se recomienda reemplazar los pernos de unión entre bridas por conexiones tipo “beam” que representan adecuadamente su comportamiento y evita la utilización de contactos, que dificultan el proceso e incrementan el tiempo de análisis.

- Por otra parte, en el análisis MEF es necesario simular el contacto entre las bridas de cada junta, por lo que se recomienda la utilización de un contacto tipo “Frictionless” que permite simular la separación entre bridas y su respectivo deslizamiento.
- Debido a la complejidad existente en el diseño y análisis de este tipo de estructuras se recomienda la utilización de prototipos a escala para la aceptación y validación de resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Kumar, M. Raju y T. Naidu, "Effect of wind speed on structural behaviour of Monopole and self-support telecommunication towers," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, n° 6, pp. 911-927, 2017.
- [2] A. Al-jassani y J. Al-suraifi, "Telecommunication Cell Tower Most Common Alternatives," *American Journal of Civil Engineering*, vol. 5, n° 5, pp. 268-281, 2017.
- [3] J. Riya y V. Jobil, "Analysis of Monopole Communication Tower," *International Journal of Engineering Studies and Technical Approach*, vol. 1, n° 11, pp. 23-34, 2015.
- [4] H. David, "Discussion of Current Issues Related to Steel Telecommunications Monopole Structures," *Structures Congress*, vol. 1, n° 1, pp. 2417-2438, 2010.
- [5] L. Peng y J. Chinniah, "Dynamic Analysis of Telecommunication Monopole under Wind Loads," vol. 1, n° 1, pp. 26-29, 2007.
- [6] F. Meisami, M. Moavenian y A. Afsharfard, "Nonlinear behavior of single bolted flange joints: A novel analytical model," *Engineering Structures*, vol. 1, n° 173, pp. 908-917, 2018.
- [7] Z.-Q. Yu Luan y S. Geng-Dong, "A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 1, n° 331, pp. 325-344, 2012.
- [8] B. Bartłomiej y G. Witold, "Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring," *Engineering Structures*, vol. 1, n° 111, pp. 93-103, 2016.
- [9] Y. Wang, L. Zong y J. Shi, "Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 1, n° 84, pp. 1-16, 2013.

- [10] M. Pavlovic, C. Heistermann, M. Veljkovic, D. Pak, M. Feldmann, C. Rebelo y L. Simões da Silva, "Friction connection vs. ring flange connection in steel towers for wind converters," *Engineering Structures*, vol. 1, n° 98, pp. 151-162, 2015.
- [11] S. A. L. Hernández, "Diseño de Torres de Telecomunicación," Ciudad Universitaria, 2016.
- [12] KEHANG, "Diseño de la Torre Monopolo," SteelTowerCHH, 21 Mayo 2018. [En línea]. Available: <http://www.steeltowerchn.com/es/communication-tower/monopole-tower/design-of-monopole-tower/>. [Último acceso: Octubre 2018].
- [13] H. Zerres y Y. Guerout, "Present calculation methods dedicated to bolted flanged connections," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 211 - 216, 2004.
- [14] P. Martín, V. Parnás y Á. Castañeda , "Evaluación de la vulnerabilidad estructural de torres autoportadas de telecomunicaciones bajo cargas de viento y sismo," Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. CUJAE, Ciudad de La Habana. CUBA, 2012.
- [15] M. Pavan, P. Markandeya, M. Navya y G. Naidu, "Effect of wind speed on structural behaviour of Monopole and self-support telecommunication towers," *Asian Journal of Civil Engineering* , vol. 18, n° 6, pp. 911 - 927, 2017.
- [16] M. Armijo, "Situación Estructural de Torres de Telecomunicaciones," Guayaquil, Ecuador, 2010.
- [17] H. Van-Long, J. Jean-Pierre y D. Jean-Francois, "Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: Experimental tests," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 85, pp. 1 - 11, 2013.
- [18] C. Apolo y W. Cangás, Análisis estructural de la torres de telecomunicación para antenas de última tecnología, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [19] R. Budynas y K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México: McGraw-Hill, 2008.

- [20] American Society of Civil Engineers, Design of Steel Transmission Pole Structures ASCE/SEI 48-11, 2012.
- [21] Telecommunications Industry Association, Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas TIA-222-G, 2005.
- [22] E. Tarifa, Teoría de Modelos y Simulación. Introducción a la Simulación, San Salvador de Jujuy: Argentina: Universidad Nacional de Jujuy.
- [23] C. Cueva y F. Curicama, Análisis comparativo a fatiga y vibración de resortes automotores tipo hoja de la empresa Vanderbilt S.A. por el método de elementos finitos y pruebas experimentales, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [24] Ansys Inc., "ANSYS Structural Analysis Guide," 20 Octubre 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.ansys.stuba.sk/html/guide_55/g-str/GSTRTOc.htm. [Último acceso: Abril 2019].
- [25] Z. O.C, The Finite Element Method, Nueva Jersey: Prentice Hall, 1979.
- [26] A. Cubillos, Introducción al Método de los Elementos Finitos, Ibagué: Colombia: Universidad de Ibagué, 2008.
- [27] D. Logan, A First Course in the Finite Element Method, Stamford: Cengage Learning, 2012.
- [28] D. Hutton, Fundamentals of Finite Element Analysis, New York: McGraw-Hill, 2004.
- [29] S. Pezzotti y F. Antico, Introducción a la Teoría de Elementos Finitos, Buenos Aires: Argentina: Universidad Nacional de la Plata, 2008.
- [30] T. Simpson, J. Peplinski, P. Koch y J. Allen, "Metamodels for computer-based engineering design: Survey and Recommendations," *Engineering With Computers*, vol. 17, n° 2, pp. 129-150, 2001.
- [31] G. Wang, "Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization," *Journal of Mechanical Design*, vol. 129, n° 4, pp. 370-380, 2007.

- [32] E. Martínez, Análisis de la influencia del proceso de galvanizado en caliente en la resistencia a la fatiga de pernos SAE Grado 5 utilizados en juntas a corte para torres de telecomunicaciones, Ambato: Universidad Técnica de Amabato, 2018.
- [33] E. Ruiz, Optimización del análisis de la resistencia de la estructura de un asiento de bus urbano mediante metamodelo de simulación, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2018.
- [34] American Institute of Steel Construction, Especificacion ANSI/AISC 360-10 para construcciones de Acero, Santiago de Chile: Asociacion Latinoamericana del Acero, 2010.

ANEXOS

ASCE STANDARD

ASCE/SEI 48-11

American Society of Civil Engineers

Design of Steel Transmission Pole Structures

ASCE/SEI 48-11

This document uses both the International System of Units (SI) and customary units.



Published by the American Society of Civil Engineers

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

Design of steel transmission pole structures: standard 48-11.

p. cm. — (ASCE standard)

“ASCE/SEI 48-11.”

“This document uses both the International System of Units (SI) and customary units.”

Includes bibliographical references and index.

ISBN 978-0-7844-1181-0 (alk. paper)

1. Electric lines—Poles and towers—Design and construction. I. American Society of Civil Engineers.

TK3242.D475 2011

621.319'22—dc23

2011031788

Published by American Society of Civil Engineers

1801 Alexander Bell Drive

Reston, Virginia 20191

www.pubs.asce.org

This standard was developed by a consensus standards development process which has been accredited by the American National Standards Institute (ANSI). Accreditation by ANSI, a voluntary accreditation body representing public and private sector standards development organizations in the U.S. and abroad, signifies that the standards development process used by ASCE has met the ANSI requirements for openness, balance, consensus, and due process.

While ASCE's process is designed to promote standards that reflect a fair and reasoned consensus among all interested participants, while preserving the public health, safety, and welfare that is paramount to its mission, it has not made an independent assessment of and does not warrant the accuracy, completeness, suitability, or utility of any information, apparatus, product, or process discussed herein. ASCE does not intend, nor should anyone interpret, ASCE's standards to replace the sound judgment of a competent professional, having knowledge and experience in the appropriate field(s) of practice, nor to substitute for the standard of care required of such professionals in interpreting and applying the contents of this standard.

ASCE has no authority to enforce compliance with its standards and does not undertake to certify products for compliance or to render any professional services to any person or entity.

ASCE disclaims any and all liability for any personal injury, property damage, financial loss or other damages of any nature whatsoever, including without limitation any direct, indirect, special, exemplary, or consequential damages, resulting from any person's use of, or reliance on, this standard. Any individual who relies on this standard assumes full responsibility for such use.

ASCE and American Society of Civil Engineers—Registered in U.S. Patent and Trademark Office.

Photocopies and reprints. You can obtain instant permission to photocopy ASCE publications by using ASCE's online permission service (<http://pubs.asce.org/permissions/requests/>). Requests for 100 copies or more should be submitted to the Reprints Department, Publications Division, ASCE (address above); e-mail: permissions@asce.org. A reprint order form can be found at <http://pubs.asce.org/support/reprints/>.

Copyright © 2012 by the American Society of Civil Engineers.

All Rights Reserved.

ISBN 978-0-7844-1181-0

Manufactured in the United States of America.

18 17 16 15 14 13 12 11 1 2 3 4 5

Chapter 4 LOADING, GEOMETRY, AND ANALYSIS

4.1 INTRODUCTION

This section details the minimum basic information that the Owner shall provide in a written specification to enable the Structure Designer to design the structure. This section also details the methods of analysis that shall be used by the Structure Designer to design the structure.

4.2 LOADING

4.2.1 Factored Design Loads. Factored design loads shall be determined by the Owner and included in the design specification, drawings, or documents.

4.2.2 Loading Considerations. The development of factored design loads shall consider the following:

1. Conductor and shield wire properties,
2. Minimum legislated loads,
3. Historical climatic conditions,
4. Structure orientation,
5. Construction and maintenance operations,
6. Line security provisions, and
7. Unique loading situations.

4.2.3 Load Expression. Factored design loads shall be specified by the Owner and shall be expressed in the form of load trees or in tabular form. Factored design loads shall include the magnitude, direction, and point of application with respect to a single orthogonal coordinate system.

4.3 GEOMETRIC CONFIGURATIONS

4.3.1 Configuration Considerations. Tubular steel pole structures shall be designed with geometric configurations that are based on electrical, economic, and safety requirements specified by the Owner.

4.3.2 Structure Types. Tubular steel pole structures shall be designed as either self-supporting or guyed structures as specified by the Owner.

4.4 METHODS OF ANALYSIS

The Structure Designer shall use established principles of structural analysis to determine the forces and moments caused by the factored design loads.

4.4.1 Structural Analysis Methods. The Structure Designer shall use geometrically nonlinear elastic stress analysis methods.

4.4.2 Analysis of Connections. The Structure Designer shall be responsible for the analysis of all connections. This analysis shall be substantiated by stress calculations or by test results.

4.5 ADDITIONAL CONSIDERATIONS

4.5.1 Structural Support. The Owner shall specify the type and degree of support provided by foundations or guys that will be used with the installed structure. Additional requirements regarding foundations appear in Section 9.2.

4.5.2 Design Restrictions. The Owner shall specify design restrictions, including shipping length, shipping weight, diameter, taper, deflection, finish, shaft-to-shaft connection type, foundation type, and guy attachment and anchor location if applicable.

4.5.3 Climbing and Maintenance Provisions. The Owner shall specify the types and positions of climbing and maintenance apparatus. This includes information concerning ladder or step attachment devices, grounding connection provisions, and "hot line" maintenance equipment attachment details, where applicable.

4.5.4 Pre-engineered Steel Poles ("Wood Pole Equivalents"). The term "wood pole equivalents" shall not be used to specify pre-engineered steel poles. Pre-engineered steel poles shall be selected in accordance with the requirements of this Standard and therefore shall not be selected solely based on wood pole classification. The Owner and/or Line Designer shall be responsible for determining the applicable loads and loading criteria, geometric configuration, type and degree of structural support, and any design restrictions, as well as any other required design or performance characteristics for pre-engineered steel poles. When a pre-engineered steel pole is specified without providing loads, the Owner and/or Line Designer shall be responsible for determining that the pole and all other structural components and attachments are adequate for the intended use and loads.

Chapter 5 DESIGN OF MEMBERS

5.1 INTRODUCTION

The design stresses for members shall be based on ultimate strength methods using factored design loads.

5.2 MEMBERS

This section contains criteria for determining design stress levels in tubular members and in truss members. Ground sleeves shall not be considered as structural members in the design.

5.2.1 Materials.

5.2.1.1 Specifications. Materials conforming to the following ASTM specifications are suitable for use under this standard:

ASTM A36/A36M, Standard Specification for Carbon Structural Steel;

ASTM A529/A529M, Standard Specification for High-Strength Carbon-Manganese Steel of Structural Quality; ASTM A572/A572M, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel;

ASTM A588/A588M, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel with 50 ksi (345 MPa) Minimum Yield Point to 4-in. (100 mm) Thick;

ASTM A595, Standard Specification for Steel Tubes, Low-Carbon, Tapered for Structural Use;

ASTM A606, Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled, and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance; ASTM A633/A633M, Standard Specification for Normalized High-Strength Low-Alloy Structural Steel Plates;

ASTM A871/A871M, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel Plate with Atmospheric Corrosion Resistance; and

ASTM A1011/A1011M, Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low Alloy, and High-Strength Low Alloy with Improved Formability.

This listing of suitable steels does not exclude the use of other steels that conform to the chemical and mechanical properties of one of the listed specifications or other published specifications, which establish the properties and suitability of the materials. As a minimum, material shall meet the requirements of ASTM A6 or ASTM A568, as applicable.

5.2.1.2 Material Properties. The yield stress, F_y , and the tensile stress, F_u , shall be the specified minimum values determined according to the appropriate ASTM specification. The modulus of elasticity, E , for steel is defined to be 29,000 ksi (200 GPa).

5.2.1.3 Energy-Impact Properties. Impact properties in the longitudinal direction of all structural plate or coil materials shall

be determined in accordance with the Charpy V-notch test described in ASTM A370 and, at a minimum, shall meet the requirements of 15 ft-lb (20 J) absorbed energy at a temperature of -20°F (-29°C). Absorbed energy requirements for subsized test specimens shall be in accordance with ASTM A370 and A673.

For all plate and coil materials of any thickness, heat-tot testing shall be used unless specified differently by the Owner.

5.2.2 Tension. The tensile stress shall not exceed either of the following:

$$\frac{P}{A_g} \leq F_t \quad \text{where } F_t = F_y, \quad (\text{Eq. 5.2-1})$$

or

$$\frac{P}{A_n} \leq F_t \quad \text{where } F_t = 0.83F_u \quad (\text{Eq. 5.2-2})$$

where P = axial tension force on member;

A_g = gross cross-sectional area;

F_t = tensile stress permitted;

F_y = specified minimum yield stress;

A_n = net cross-sectional area; and

F_u = specified minimum tensile stress.

5.2.3 Compression. Members subjected to compressive forces shall be checked for general stability and local buckling. The compressive stresses shall not exceed those permitted in the following sections.

5.2.3.1 Truss Members. For truss members with a uniform closed cross section, the actual compressive stress, f_c , shall not exceed the compressive stress permitted, F_c , as determined by the following:

$$F_c = F_y \left[1 - 0.5 \left(\frac{KL}{C_c} \right)^2 \right] \quad \text{when } \frac{KL}{r} \leq C_c \quad (\text{Eq. 5.2-3})$$

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad \text{when } \frac{KL}{r} > C_c \quad (\text{Eq. 5.2-4})$$

$$C_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{F_y}} \quad (\text{Eq. 5.2-5})$$

where F_c = compressive stress permitted;

F_y = specified minimum yield stress;

K = effective length factor;

L = unbraced length;

r = governing radius of gyration;

C_c = column slenderness ratio; and

E = modulus of elasticity.

KL/r is the largest slenderness ratio of any unbraced segment. Truss members made of angles shall be designed in accordance with Section 3.7 of ASCE 10 [C5-3].

5.2.3.2 Beam Members. The limiting values of w/t and D_o/t specified in this section may be exceeded without requiring a reduction in extreme fiber stress if local buckling stability is demonstrated by an adequate program of tests.

5.2.3.2.1 Regular Polygonal Members. For formed, regular polygonal tubular members, the compressive stress, $P/A + Mc/I$, on the extreme fiber shall not exceed the following:

Octagonal, hexagonal, or rectangular members (bend angle $\geq 45^\circ$)

$$F_a = F_y \quad \text{when} \quad \frac{w}{t} \leq \frac{260 \Omega}{\sqrt{F_y}} \quad (\text{Eq. 5.2-6})$$

$$F_a = 1.42 F_y \left(1.0 - 0.00114 \frac{1}{\Omega} \sqrt{F_y} \frac{w}{t} \right) \quad (\text{Eq. 5.2-7})$$

when $\frac{260 \Omega}{\sqrt{F_y}} < \frac{w}{t} \leq \frac{351 \Omega}{\sqrt{F_y}}$

Dodecagonal members (bend angle = 30°)

$$F_a = F_y \quad \text{when} \quad \frac{w}{t} \leq \frac{240 \Omega}{\sqrt{F_y}} \quad (\text{Eq. 5.2-8})$$

$$F_a = 1.45 F_y \left(1.0 - 0.00129 \frac{1}{\Omega} \sqrt{F_y} \frac{w}{t} \right) \quad (\text{Eq. 5.2-9})$$

when $\frac{240 \Omega}{\sqrt{F_y}} < \frac{w}{t} \leq \frac{374 \Omega}{\sqrt{F_y}}$

Hexdecagonal members (bend angle = 22.5°)

$$F_a = F_y \quad \text{when} \quad \frac{w}{t} \leq \frac{215 \Omega}{\sqrt{F_y}} \quad (\text{Eq. 5.2-10})$$

$$F_a = 1.42 F_y \left(1.0 - 0.00137 \frac{1}{\Omega} \sqrt{F_y} \frac{w}{t} \right) \quad (\text{Eq. 5.2-11})$$

when $\frac{215 \Omega}{\sqrt{F_y}} < \frac{w}{t} \leq \frac{412 \Omega}{\sqrt{F_y}}$

where F_y = specified minimum yield stress;
 F_a = compressive stress permitted;
 w = flat width of a side;
 t = wall thickness;
 Ω = 1.0 for F_y or F_a in ksi and 2.62 for F_y or F_a in MPa; and
 Φ = 1.0 for F_a in ksi and 6.90 for F_a in MPa.

In determining w , the actual inside bend radius shall be used unless it exceeds $4t$, in which case it shall be taken equal to $4t$. For sections with two or more plies, this criterion shall be satisfied for each ply.

Table 5.1 summarizes the equations that shall be used to determine the compressive stress permitted based on bend angle and axial stress.

5.2.3.2.2 Rectangular Members. Eqs. 5.2-6, and 5.2-7 shall be used for rectangular members. The flat width associated with each side shall be treated separately. If the axial stress, f_a , is greater than 1 ksi (6.9 MPa), Eqs. 5.2-8 and 5.2-9 shall be used.

5.2.3.2.3 Polygonal Elliptical Members. The bend angle and flat width associated with elliptical cross sections are not constant. The smallest bend angle associated with a particular flat shall be

TABLE 5-1. Compressive Stress Permitted Based on Bend Angle

Bend Angle	t_s	Equation
$\geq 45^\circ$	≥ 1 ksi (6.9 MPa)	5.2-6, 5.2-7
$\geq 45^\circ$	> 1 ksi (6.9 MPa)	5.2-8, 5.2-9
$\geq 30^\circ$ but $< 45^\circ$	NA	5.2-8, 5.2-9
$\geq 22.5^\circ$ but $< 30^\circ$	NA	5.2-10, 5.2-11
$< 22.5^\circ$	NA	5.2-12, 5.2-13, 5.2-14, 5.2-15, 5.2-16

Note: NA means not applicable.

used to determine the compressive stress permitted. See Table 5.1 to determine which equations shall be used based on this bend angle.

5.2.3.2.4 Round Members. For round members or regular polygonal members with more than sixteen sides, the compressive stress shall be proportioned to satisfy the following equation:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1 \quad (\text{Eq. 5.2-12})$$

where f_a = compressive stress due to axial loads;
 f_b = compressive stress due to bending moments;
 F_a = compressive stress permitted; and
 F_b = bending stress permitted.

$$F_a = F_y \quad \text{when} \quad \frac{D_o}{t} \leq \frac{3800 \Phi}{F_y} \quad (\text{Eq. 5.2-13})$$

$$F_a = 0.75 F_y + \frac{950 \Phi}{\frac{D_o}{t}} \quad \text{when} \quad \frac{3800 \Phi}{F_y} < \frac{D_o}{t} \leq \frac{12,000 \Phi}{F_y} \quad (\text{Eq. 5.2-14})$$

$$F_b = F_y \quad \text{when} \quad \frac{D_o}{t} \leq \frac{6000 \Phi}{F_y} \quad (\text{Eq. 5.2-15})$$

$$F_b = 0.70 F_y + \frac{1800 \Phi}{\frac{D_o}{t}} \quad \text{when} \quad \frac{6000 \Phi}{F_y} < \frac{D_o}{t} \leq \frac{12,000 \Phi}{F_y} \quad (\text{Eq. 5.2-16})$$

where D_o = outside diameter of the tubular section (flat-to-flat outside diameter for polygonal members);
 t = wall thickness; and
 Φ = 1.0 for F_y , F_a , or F_b in ksi and 6.90 for F_y , F_a , or F_b in MPa.

5.2.4 Shear. The shear stress resulting from applied shear forces, torsional shear, or a combination of the two shall satisfy the following equation:

$$\frac{VQ}{Ib} + \frac{Tc}{J} \leq F_v \quad \text{where} \quad F_v = 0.58 F_y \quad (\text{Eq. 5.2-17})$$

where V = shear force;
 Q = moment of section about neutral axis;
 I = moment of inertia;
 b = 2 times wall thickness (t)
 T = torsional moment;
 c = distance from neutral axis to extreme fiber;
 J = torsional constant of cross section;
 F_v = shear stress permitted; and
 F_y = specified minimum yield stress.

5.2.5 Bending. The stress resulting from bending shall not exceed either of the following:

$$\frac{Mc}{I} \leq F_t \quad (\text{Eq. 5.2-18})$$

or

$$\frac{Mc}{I} \leq F_a \quad (\text{Eq. 5.2-19})$$

where M = bending moment;
 c = distance from neutral axis to extreme fiber;
 I = moment of inertia;
 F_t = tensile stress permitted; and
 F_a = compressive stress permitted.

5.2.6 Combined Stresses. For a polygonal member, the combined stress at any point on the cross section shall not exceed the following:

$$\left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_x}{I_x} + \frac{M_y c_y}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{It} + \frac{Tc}{J} \right)^2 \right]^{(1/2)} \leq F_t \quad \text{or} \quad F_a \quad (\text{Eq. 5.2-20})$$

For a round member, the combined stress at any point on the cross section shall not exceed the following:

$$\left[\left(\frac{P}{A} + \frac{M_x c_x}{I_x} + \frac{M_y c_y}{I_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{VQ}{It} + \frac{Tc}{J} \right)^2 \right]^{(1/2)} \leq F_t \quad \text{or} \quad F_b \quad (\text{Eq. 5.2-21})$$

where F_a = compressive stress permitted by Section 5.2.3.2.1;
 F_b = bending stress permitted by Section 5.2.3.2.4;
 F_t = tensile stress permitted by Section 5.2.2;
 P = axial force on member;
 A = cross-sectional area;
 M_x = bending moment about X-X axis;
 M_y = bending moment about Y-Y axis;
 I_x = moment of inertia about X-X axis;
 I_y = moment of inertia about Y-Y axis;
 c_x = distance from Y-Y axis to point where stress is checked;

c_y = distance from X-X axis to point where stress is checked;
 V = total resultant shear force;
 Q = moment of section about neutral axis;
 I = moment of inertia;
 T = torsional moment;
 J = torsional constant of cross section;
 c = distance from neutral axis to point where stress is checked; and
 t = wall thickness.

The bending stress (Mc/I) and shear stress portions of these equations shall be absolute values (i.e., always positive). The same equation shall be used to check tension and compression stresses. When checking tension, P/A is positive if the member is in tension and negative if the member is in compression. The converse is true when checking compression.

5.3 GUYS

5.3.1 Material Properties. The minimum rated breaking strength of guys shall be determined according to the appropriate ASTM specification or as specified by the Owner. The modulus of elasticity, E , of a guy shall be as specified by the applicable ASTM specification or as specified by the Owner. In the absence of a specified value, E shall be assumed to be 23,000 ksi (159 GPa).

5.3.2 Tension. The maximum design tension force in a guy shall not exceed the following:

$$P \leq P_{\max} \quad \text{where} \quad P_{\max} = 0.65 \text{ RBS} \quad (\text{Eq. 5.3-1})$$

where P = tension force in the guy;
 P_{\max} = maximum tension force permitted in the guy; and
RBS = minimum rated breaking strength of the guy.

5.4 TEST VERIFICATION

Design values other than those prescribed in this section are permitted, but they shall be substantiated by experimental or analytical investigations.

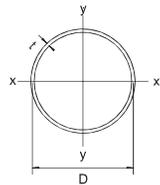
APPENDIX II PROPERTIES OF VARIOUS TUBULAR SECTIONS

Approximate equations for commonly used section properties are shown in Figures A-II-1 through A-II-6.

Note: For polygon sections of Figs. A-II-1 to A-II-6, all properties except flat width (w) assume sharp-cornered section.

Notation for Appendix II

a = angle between the x -axis and the corner of the polygon;
 A_g = gross area;



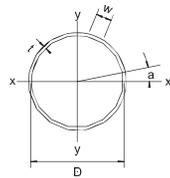
$$A_g = 3.14 \cdot D \cdot t \quad r = 0.354 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.393 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.637}{D \cdot t}$$

$$C_x = 0.5 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.5 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.637 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

FIGURE A-II-1. PROPERTIES OF ROUND SECTIONS.



$$A_g = 3.19 \cdot D \cdot t \quad r = 0.356 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.403 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.634}{D \cdot t}$$

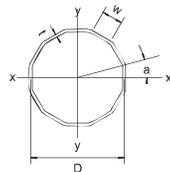
$$C_x = 0.510 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.510 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.628 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

$$w = 0.199 \cdot (D-t-2 \cdot BR)$$

$$a = 11.25^\circ$$

FIGURE A-II-2. PROPERTIES OF HEXDECAGONAL (16-SIDED POLYGON) SECTIONS.



$$A_g = 3.22 \cdot D \cdot t \quad r = 0.358 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.411 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.631}{D \cdot t}$$

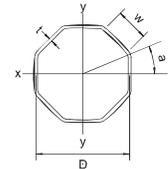
$$C_x = 0.518 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.518 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.622 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

$$w = 0.268 \cdot (D-t-2 \cdot BR)$$

$$a = 15^\circ$$

FIGURE A-II-3. PROPERTIES OF DODECAGONAL (12-SIDED POLYGON) SECTIONS.



$$A_g = 3.32 \cdot D \cdot t \quad r = 0.364 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.438 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.618}{D \cdot t}$$

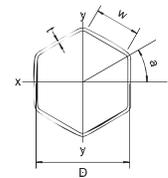
$$C_x = 0.541 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.541 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.603 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

$$w = 0.414 \cdot (D-t-2 \cdot BR)$$

$$a = 22.5^\circ$$

FIGURE A-II-4. PROPERTIES OF OCTAGONAL (8-SIDED POLYGON) SECTIONS.



$$A_g = 3.46 \cdot D \cdot t \quad r = 0.373 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.481 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.606}{D \cdot t}$$

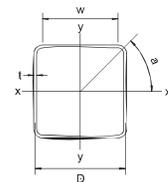
$$C_x = 0.577 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.577 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.577 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

$$w = 0.577 \cdot (D-t-2 \cdot BR)$$

$$a = 30^\circ$$

FIGURE A-II-5. PROPERTIES OF HEXAGONAL (6-SIDED POLYGON) SECTIONS.



$$A_g = 4.00 \cdot D \cdot t \quad r = 0.408 \cdot D$$

$$I_x = I_y = 0.666 \cdot D^3 \cdot t \quad \text{Max. } \frac{Q}{It} = \frac{0.563}{D \cdot t}$$

$$C_x = 0.707 \cdot (D+t) \cdot \cos(a)$$

$$C_y = 0.707 \cdot (D+t) \cdot \sin(a) \quad \text{Max. } \frac{C}{J} = \frac{0.500 \cdot (D+t)}{(D^3 \cdot t)}$$

$$w = (D-t-2 \cdot BR)$$

$$a = 45^\circ$$

FIGURE A-II-6. PROPERTIES OF SQUARE SECTIONS.

ANEXO 2

ANSI/TIA-222-G



TIA STANDARD

Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas

TIA-222-G
(Revision of TIA-222-F)

August 2005

TELECOMMUNICATIONS
INDUSTRY ASSOCIATION



ANSI/TIA-222-G-2005
APPROVED: AUGUST 2, 2005
REAFFIRMED: DECEMBER 20, 2012

Norma estructural para antenas y estructuras que soportan antenas

OBJETIVO

El objetivo de esta Norma es proveer literatura reconocida para las antenas y estructuras que soportan antenas en lo relacionado con: (a) requisitos sobre cargas mínimas tal como se derivan de ASCE 7- 02, "Cargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras", y (b) criterios de diseño tal como se derivan de AISC-LRFD-99, "Especificación para el diseño de edificios de acero estructural por el método de factores de carga y resistencia", y ACI 318-05, "Código de construcción para hormigón estructural". La información contenida en esta Norma se obtuvo de las fuentes a las cuales se hace referencia en la presente y representa, a juicio del subcomité, las prácticas aceptadas por la industria en relación con las normas mínimas para el diseño de antenas y estructuras que soportan antenas. Aunque se cree que es correcta, no se debería confiar en esta información para ninguna aplicación específica sin que un examen profesional y verificación profesional de su exactitud, aptitud y aplicabilidad por parte de un ingeniero habilitado. En esta Norma se usan criterios de carga que se basan en una probabilidad anual, y no pretende abarcar todas las condiciones ambientales que podrían existir en una ubicación particular.

Esta Norma se puede adaptar para su uso internacional, para lo cual será necesario determinar las velocidades básicas del viento (ráfaga de 3 segundos), cargas de viento sobre hielo, y aceleraciones sísmicas en el sitio de emplazamiento en base a datos locales.

En estas normas las unidades equivalentes del Sistema Internacional se presentan entre corchetes []. El Anexo M contiene los factores para conversión al SI.

El Anexo A contiene lineamientos para la adquisición y una guía para los usuarios que ayudará a especificar requisitos para una estructura específica. Se advierte al usuario que si se conocen los requisitos de carga específicamente aplicables al sitio de emplazamiento, éstos tienen prioridad sobre los requisitos mínimos establecidos en esta Norma. Los datos específicos del sitio de emplazamiento que difieran de aquellos contenidos en esta Norma se deberán incluir en las especificaciones para la adquisición de la estructura.

Esta Norma pretende describir los requisitos para la mayoría de las antenas estructurales y estructuras que soportan antenas, pero reconoce que las estructuras poco habituales en cuanto a su altura o geometría, o en cuanto a la forma y tamaño de algunos de sus elementos individuales, o ubicadas en predios donde las condiciones geológicas o climáticas son inusuales pueden requerir consideraciones adicionales. En estos casos se deberá realizar un diseño racional basado en la teoría, el análisis, el conocimiento de las condiciones locales y buenas prácticas de la ingeniería. El diseño deberá ser realizado por un ingeniero calificado en los métodos de diseño y materiales específicos a utilizar, y deberá proveer un nivel de seguridad y desempeño iguales o superiores a los implícitos en esta Norma.

ALCANCE

Copyright Telecommunications Industry Association
La reproducción o circulación del presente documento sin licencia de IHS no está permitida.

8

Esta Norma describe los requisitos para el diseño estructural y la fabricación de antenas estructurales nuevas así como para la modificación de antenas estructurales existentes, además de requisitos para el diseño estructural, la fabricación y la modificación de las estructuras, soportes, componentes estructurales, riendas, aislantes y fundaciones que soportan antenas.

Esta Norma se basa en el diseño para estados límites. Se aplica fundamentalmente a las estructuras de acero, pero en caso de ser requerido también se puede aplicar para otros materiales de manera de proveer un nivel de confiabilidad equivalente.

Para las estructuras que soportan antenas pero que han sido diseñadas principalmente para otras aplicaciones (tanques de agua, estructuras para líneas de transmisión eléctrica, estructuras para carteles, edificios, puentes, etc.) el usuario deberá utilizar las normas correspondientes. Sin embargo, esta Norma sí se aplica al cálculo de las áreas efectivas proyectadas de los accesorios (antenas, soportes, cables, etc.) y a los estados límites de servicio apropiados para las estructuras que soportan antenas.

1.0 DISPOSICIONES GENERALES

1.1 Estados límites de resistencia

Una estructura diseñada conforme a esta Norma deberá tener resistencia y estabilidad suficientes para que la resistencia de diseño, ϕR_n , definida en la Sección 4.0 sea mayor o igual que la resistencia requerida, $\Sigma\alpha_i Q_i$, definida en la Sección 2.0, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\phi R_n \geq \Sigma\alpha_i Q_i$$

1.2 Estados límites de servicio

Una estructura diseñada conforme a esta Norma deberá tener rigidez suficiente para que bajo las cargas de servicio definidas en 2.8.3 no se superen las deformaciones en estado límite definidas en 2.8.2.

1.3 Análisis

Las solicitaciones sobre los elementos estructurales individuales se deberán determinar mediante métodos de análisis estructural que consideren el equilibrio, la estabilidad general, la compatibilidad geométrica y las propiedades de los materiales de acuerdo con la Sección 3.0.

1.4 Definiciones

Estructura que soporta antenas: Estructura que soporta antenas o arreglos de antenas, incluyendo sus riendas, los anclajes de las riendas y las subestructuras.

Resistencia de diseño, ϕR_n : Producto entre la resistencia nominal y un factor de resistencia.

Carga mayorada: Producto entre la carga nominal y un factor de carga.

Estado límite: Condición más allá de la cual una estructura o elemento deja de ser apto para el servicio y se considera que ya no es útil para la función pretendida o es inseguro para dicha función.

Solicitaciones: Respuestas de fuerza y deformación que las cargas mayoradas aplicadas producen en las estructuras y sus elementos.

Factor de carga, α_i : Factor que toma en cuenta las desviaciones de la carga real respecto de la carga nominal, las incertidumbres en el análisis que transforma la carga en solicitaciones, y la probabilidad de que más de una carga extrema ocurran simultáneamente.

Cargas nominales: Magnitudes de las cargas especificadas en esta Norma para cargas permanentes, de viento, de hielo, de viento sobre hielo, sísmicas, y correspondientes a los accesorios para ascenso e instalaciones de trabajo.

Resistencia nominal, R_n : Capacidad de una estructura o elemento para resistir las solicitaciones.

Resistencia requerida, $\Sigma\alpha_i Q_i$: Sumatoria de las solicitaciones debidas a las cargas mayoradas y combinaciones de cargas aplicadas.

Factor de resistencia, ϕ : Factor que toma en cuenta el modo de falla y sus consecuencias, además de las inevitables desviaciones respecto de una resistencia nominal calculada.

Diseño por resistencia: Método de dimensionamiento de elementos estructurales según el cual los esfuerzos calculados que las cargas mayoradas producen en los elementos no deben ser mayores que las resistencias de los elementos.

Antena estructural: Estructura diseñada para emitir o recibir ondas electromagnéticas, incluyendo los reflectores, directores y pantallas.

1.5 Simbología y notación

ϕR_n = resistencia de diseño (resistencia nominal multiplicada por un factor de resistencia);

$\Sigma\alpha_i Q_i$ = resistencia requerida (solicitaciones debidas a las cargas y combinaciones de cargas mayoradas).

2.0 CARGAS

2.1 Alcance

Esta sección proporciona requisitos de carga mínimos para antenas y estructuras que soportan antenas.

2.2 Clasificación de las estructuras

A los fines de la determinación de las cargas nominales de viento, hielo y sísmicas, las estructuras se clasificarán de acuerdo con la Tabla 2-1.

2.3 Combinaciones de cargas

2.3.1 Simbología y notación

D = carga permanente de la estructura y los accesorios, excluyendo las riendas;

D_g = carga permanente de las riendas;

D_i = peso de hielo debido al espesor de hielo mayorado;

E = carga sísmica;

T_i = solicitaciones debidas a la temperatura;

W_o = carga de viento sin hielo;

W_i = carga de viento concurrente con espesor de hielo mayorado.

2.3.2 Combinaciones de cargas para estado límite de resistencia

Las estructuras y fundaciones se deberán diseñar de manera tal que su resistencia de diseño sea mayor o igual que las solicitaciones debidas a las cargas mayoradas para cada una de las siguientes combinaciones correspondientes al estado límite:

1. $1.2 D + 1.0 D_g + 1.6 W_o$
2. $0.9 D + 1.0 D_g + 1.6 W_o$
3. $1.2 D + 1.0 D_g + 1.0 D_i + 1.0 W_i + 1.0 T_i$
4. $1.2 D + 1.0 D_g + 1.0 E$
5. $0.9 D + 1.0 D_g + 1.0 E$

Excepciones:

1. No es necesario considerar los efectos de la temperatura para las estructuras autoportadas.

2. No es necesario considerar las cargas de hielo y sísmicas para las estructuras de la Clase I.
3. No se deberá aplicar un factor de carga a la tensión inicial de las riendas.
4. Las combinaciones 2 y 5 solamente se aplican a las estructuras autoportadas.

Notas:

1. En la sección 2.6.8 a la carga de hielo se le aplica un factor de conversión para estado límite.
2. Para determinar las cargas sísmicas, E, en las combinaciones 4 y 5 se deberán usar las cargas permanentes no mayoradas.
3. Para el diseño de las fundaciones, en todas las combinaciones de cargas el peso del suelo y la subestructura se deberán considerar como cargas permanentes.

2.4 Efectos térmicos

La tensión de diseño de las riendas se deberá basar en una temperatura inicial de 60 grados Fahrenheit [16 grados C]. En ausencia de datos más precisos correspondientes al sitio de emplazamiento, para las combinaciones de carga que incluyen hielo se considerará que se produce una reducción de la temperatura de 50 grados Fahrenheit [28 grados C].

2.5 Cargas permanentes

2.5.1 Definiciones

Carga permanente, D: Peso de la estructura y los accesorios excluyendo las riendas y, para el diseño de las fundaciones, el peso del suelo y la subestructura

Carga permanente de las riendas, D_g : Peso de todo el conjunto de las riendas, incluyendo las riendas propiamente dichas, los accesorios en los extremos y los aisladores.

2.6 Cargas de viento y de hielo

2.6.1 Definiciones

Accesorios: Elementos unidos a la estructura tales como antenas, soportes de antenas, líneas de transmisión, conductos, equipos de iluminación, escaleras, plataformas, carteles, dispositivos de protección, etc.

Velocidad básica del viento, V: Velocidad de una ráfaga de viento de 3 segundos a una altura de 33 ft [10 m] sobre el nivel del terreno para una categoría de exposición C tal como se define en 2.6.5.1 para un intervalo de recurrencia de 50 años.

Velocidad básica del viento con hielo, V_i : Velocidad de una ráfaga de viento de 3 segundos concurrente con el espesor de hielo de diseño a una altura de 33 ft [10 m] sobre el nivel del terreno para una exposición de categoría C tal como se define en 2.6.5.1 para un intervalo de recurrencia de 50 años.

Carga de viento de diseño, F_w : Fuerza estática equivalente a utilizar en la determinación de las cargas de viento.

Espesor de hielo de diseño, t_i : Espesor uniforme de hielo glaseado radial a una altura de 33 ft [10 m] sobre el nivel del terreno para una exposición categoría C tal como se define en 2.6.5.1 para un intervalo de recurrencia de 50 años.

Accesorio puntual: Accesorio que se puede modelar como una carga concentrada.

Área proyectada efectiva (o EPA, por sus siglas en inglés): Área proyectada de un objeto multiplicada por un coeficiente de fuerza (también llamado coeficiente de resistencia aerodinámica) que se utiliza en la determinación de las cargas de viento.

Escarpa: Acanalado o declive áspero del terreno que generalmente separa dos niveles o áreas de pendiente suave.

Hielo glaseado: Acumulación de hielo que se supone tiene un peso unitario de 56 lb/ft³ [8.8 kN/m³].

Altura de una estructura, h : Altura de la estructura, incluyendo los monopostes de celosía o tubulares instalados sobre la estructura pero excluyendo los pararrayos y otros accesorios similares.

Colina: Superficie del terreno que se caracteriza por un fuerte relieve en todas las direcciones horizontales.

Regiones de huracanes: Áreas vulnerables a los huracanes en las cuales la velocidad básica del viento sin hielo es mayor que 90 mph [40.2 m/s].

Factor de importancia, I : Factor que toma en cuenta el nivel de riesgo para la vida humana, los daños a la propiedad y la confiabilidad del servicio.

Accesorio lineal: Accesorio que se puede modelar como una carga distribuida.

Cuchilla: Cresta alargada que se caracteriza por un fuerte relieve en dos direcciones.

Accesorio simétrico: Accesorio para el cual el área proyectada efectiva (EPA) se considera constante para todas las direcciones del viento.

Presión dinámica, q_z : Fuerza estática equivalente que se utiliza en la determinación de las cargas de viento.

Peso de hielo, D_i : Peso mayorado del hielo acumulado sobre la estructura, las riendas y los accesorios.

2.6.2 Simbología y notación

- α = exponente de la ley de potencia de la velocidad de ráfaga de 3 segundos;
- ϵ = relación de solidez de la estructura sin accesorios;
- θ = ángulo relativo entre el acimut de un accesorio y la dirección del viento;
- θ_g = ángulo de incidencia del viento respecto de la cuerda de una rienda;
- A_a = área proyectada de un accesorio;
- A_r = área proyectada de los componentes estructurales planos;
- A_{rs} = área proyectada de los componentes planos que soportan un marco de montaje;
- A_g = área bruta de una cara de una torre o marco de montaje;
- A_z = área de la sección transversal de hielo a una altura z , o marco de montaje;
- A_p = área proyectada de una estructura tipo monoposte;
- A_r = área proyectada de los componentes estructurales circulares;
- A_{rs} = área proyectada de los componentes circulares que soportan un marco de montaje;
- C = coeficiente de velocidad para elementos circulares, tubulares y poligonales;
- C_a = coeficiente de fuerza para un accesorio puntual o lineal;
- C_{as} = coeficiente de fuerza para un marco de montaje;
- C_d = coeficiente de resistencia aerodinámica para una rienda;
- C_f = coeficiente de fuerza para una estructura;
- d = diámetro de una rienda;
- D = diámetro de una estructura tipo monoposte, un componente estructural circular o un accesorio circular;
- D_c = mayor dimensión de extremo a extremo de un elemento;
- D_f = factor de dirección del viento para componentes estructurales planos;
- D_i = peso del hielo;

D_r = factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares;
 D_s = menor dimensión proyectada de un elemento;
 $(EPA)_A$ = área proyectada efectiva de un accesorio;
 $(EPA)_{FN}$ = área proyectada efectiva normal de los elementos que soportan un marco de montaje;
 $(EPA)_{FT}$ = área proyectada efectiva transversal de los elementos que soportan un marco de montaje;
 $(EPA)_{MN}$ = área proyectada efectiva normal de un marco de montaje;
 $(EPA)_{MT}$ = área proyectada efectiva transversal de un marco de montaje;
 $(EPA)_N$ = área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento normal al acimut del accesorio;
 $(EPA)_S$ = área proyectada efectiva de la estructura;
 $(EPA)_T$ = área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento de un accesorio;
 e = base de los logaritmos naturales;
 f = factor de atenuación dependiente de la altura;
 F_A = fuerza de viento de diseño sobre los accesorios;
 F_G = fuerza de viento de diseño sobre las riendas;
 F_{ST} = fuerza de viento de diseño sobre la estructura;
 F_w = carga de viento de diseño;
 G_h = factor de ráfaga;
 h = altura de la estructura;
 H = altura de la cresta sobre el terreno circundante;
 I = factor de importancia;
 K_a = factor de blindaje;
 K_d = factor de probabilidad de la dirección del viento;
 K_e = constante del terreno;

K_h = factor de reducción dependiente de la altura;
 K_{iz} = factor de amplificación dependiente de la altura para el espesor de hielo;
 K_t = constante topográfica;
 K_z = coeficiente de presión dinámica;
 K_{zmin} = valor mínimo para K_z ;
 K_{zt} = factor topográfico;
 L_g = longitud de una rienda;
 q_z = presión dinámica;
 R_s = relación entre el área proyectada de los accesorios y el área proyectada del elemento estructural;
 R_r = factor de reducción para un elemento circular en una cara de una torre;
 R_{rf} = factor de reducción para un elemento circular en un marco de montaje;
 t_i = espesor de hielo de diseño correspondiente a la ubicación del sitio de emplazamiento;
 t_{iz} = espesor nominal de hielo glaseado radial a la altura z ;
 V = velocidad básica del viento sin hielo;
 V_i = velocidad básica del viento con hielo;
 z = altura sobre el terreno;
 z_g = altura nominal de la capa de contorno atmosférica.

2.6.3 Disposiciones generales

Las antenas y las estructuras que soportan antenas tienen geometrías y características de respuesta poco habituales frente a las cargas de viento. Los requisitos de esta Norma toman en cuenta los efectos de amplificación de las cargas que provocan las ráfagas de viento en resonancia con las vibraciones en el sentido del viento de las estructuras autosoportadas y atirantadas que soportan antenas.

1. Se deberán determinar la velocidad básica del viento sin hielo, V , la velocidad básica del viento con hielo, V_i , y el espesor de hielo de diseño de acuerdo con 2.6.4.

2. Se deberá determinar un factor de probabilidad de la dirección del viento, K_d , de acuerdo con la Tabla 2-2.
3. Se deberá determinar un factor de importancia, I , de acuerdo con la Tabla 2-3 en base a la clasificación de la estructura listada en la Tabla 2-1.
4. Se deberán determinar una categoría de exposición y un coeficiente de presión dinámica, K_z , para el sitio de emplazamiento de acuerdo con 2.6.5.
5. Se deberán determinar una categoría topográfica y un factor topográfico, K_{zt} , de acuerdo con 2.6.6.
6. Se deberá determinar un factor de ráfaga, G_h , de acuerdo con 2.6.7.
7. El espesor de hielo de diseño se deberá incrementar en función de la altura de acuerdo con 2.6.8.
8. La fuerza de viento de diseño se deberá determinar de acuerdo con 2.6.9.

2.6.4 Velocidad básica del viento y espesor de hielo de diseño

La velocidad básica del viento sin hielo, la velocidad básica del viento con hielo y el espesor de hielo de diseño deberán ser como se indica en el Anexo B, salvo lo dispuesto en 2.6.4.1. Se deberá considerar que el viento viene desde cualquier dirección horizontal. Se deberá considerar que el hielo es hielo glaseado.

Para las estructuras ubicadas en regiones donde el espesor de hielo de diseño sea menor o igual que 0.25 in (6 mm) se podrá ignorar el hielo.

2.6.4.1 Estimación de las velocidades básicas del viento y el espesor de hielo de diseño a partir de datos meteorológicos regionales

Para las regiones que no están incluidas en el Anexo B, para las regiones con viento o hielo especiales indicadas en el Anexo B, y para los sitios de emplazamiento para los cuales existen registros que indican que la formación de hielo en las nubes puede producir cargas significativas, para establecer valores de diseño consistentes con esta Norma a partir de los datos climáticos disponibles se deberán utilizar procedimientos de análisis estadístico de valores extremos que consideren el período de tiempo que abarcan los registros, el error de muestreo, el tiempo sobre el cual se promedia, la altura del anemómetro, la calidad de los datos y la exposición del terreno.

2.6.5 Categorías de exposición

2.6.5.1 Disposiciones generales

Se deberá determinar una categoría de exposición que refleje adecuadamente las características de las irregularidades superficiales del terreno en el sitio de emplazamiento. Se deberán tomar en cuenta las variaciones de la rugosidad superficial del terreno que surjan como consecuencia de la topografía natural y la vegetación, así como las construcciones existentes. Las estructuras se deberán asignar a una de las categorías de exposición siguientes:

1. **Exposición B:** Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosos obstáculos de tamaño mayor o igual al de una vivienda unifamiliar poco separados entre sí. El uso de esta exposición se deberá limitar a aquellas áreas en las cuales la estructura esté rodeada en todas direcciones por terreno representativo de la Exposición B en una distancia de al menos 2600 ft [800 m] o veinte veces la altura de la estructura, cualquiera sea el valor que resulte mayor.
2. **Exposición C:** Terreno abierto con obstáculos dispersos de altura generalmente inferior a 30 ft [9.1 m]. Esta categoría incluye el campo abierto, los prados y las franjas costeras en las regiones de huracanes.
3. **Exposición D:** Franjas costeras planas y sin obstáculos expuestas a vientos provenientes de aguas abiertas (excluyendo las franjas costeras en las regiones de huracanes) en una distancia de al menos 1 milla [1.61 km]. Las franjas costeras de Exposición D incluyen los cursos de agua interiores, los lagos y las áreas costeras fuera de las regiones de huracanes. La exposición D se extiende tierra adentro en una distancia de 660 ft [200 m] o veinte veces la altura de la estructura, cualquiera sea el valor que resulte mayor. Las marismas, las salinas y otros terrenos similares se deberán considerar como Exposición D.

2.6.5.2 Coeficiente de presión dinámica

En base a la categoría de exposición determinada en 2.6.5.1 se deberá calcular un coeficiente de presión dinámica (K_z) de la siguiente manera:

$$K_z = 2.01 \left(z / z_g \right)^{2/\alpha}$$

$$K_{zmin} \leq K_z \leq 2.01$$

donde:

z = altura sobre el nivel del terreno en la base de la estructura

z_g , α y K_{zmin} están tabulados en la Tabla 2-4

2.6.6 Efectos topográficos

2.6.6.1 Velocidad del viento sobre colinas, cuchillas y escarpas:

El efecto acelerador del viento en las colinas, cuchillas y escarpas aisladas que representan cambios bruscos en la topografía general, cualquiera sea la categoría de exposición a la cual correspondan, se deberá incluir en el cálculo de las cargas de viento de diseño bajo las siguientes condiciones:

1. La colina, cuchilla o escarpa está aislada y no está obstruida por ninguna otra característica topográfica de altura comparable en un radio de 2 millas [3.22 km] medidas horizontalmente a partir del punto en el cual se determina la altura de la colina, cuchilla o escarpa, y

2. La colina, cuchilla o escarpa sobresale por un factor de dos o más por encima de la altura promedio de las características del terreno circundante en un radio de 2 millas [3.22 km], y
3. La pendiente (relación vertical/horizontal) de la característica topográfica es mayor que 0.10, y
4. La altura de la característica topográfica es mayor o igual que 15 ft [4.57 m] para exposiciones C y D, y mayor o igual que 60 ft [18 m] para exposición B.

2.6.6.2 Categorías topográficas

Las estructuras se deberán asignar a una de las categorías topográficas siguientes:

1. **Categoría 1:** No hay cambios bruscos en la topografía general, por ejemplo terrenos llanos u ondulantes. No es necesario considerar el efecto acelerador del viento.
2. **Categoría 2:** Estructuras ubicadas en la cresta de una escarpa o cerca de la misma. Se deberá considerar que se produce un efecto acelerador del viento en todas las direcciones. Las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una escarpa u horizontalmente a una distancia mayor que 8 veces la altura de la escarpa a partir de su cresta podrán ser consideradas como pertenecientes a la categoría topográfica 1.
3. **Categoría 3:** Estructuras ubicadas en la mitad superior de una colina. Se deberá considerar que se produce un efecto acelerador del viento en todas las direcciones. Las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una colina podrán ser consideradas como pertenecientes a la categoría topográfica 1.
4. **Categoría 4:** Estructuras ubicadas en la mitad superior de una cuchilla. Se deberá considerar que se produce un efecto acelerador del viento en todas las direcciones. Las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una cuchilla podrán ser consideradas como pertenecientes a la categoría topográfica 1.
5. **Categoría 5:** Los criterios para el efecto acelerador del viento se deberán basar en investigaciones específicas para el sitio de emplazamiento.

2.6.6.3 Estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras

No se deberá usar el efecto acelerador del viento para tomar en cuenta las mayores cargas de viento requeridas debido a la altura para las estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras. La altura, z, sobre el nivel del terreno se deberá tomar con referencia al nivel de piso del edificio u otra estructura de apoyo.

2.6.6.4 Factor topográfico

El efecto acelerador del viento se deberá incluir en el cálculo de las cargas de viento de diseño usando el factor K_{zt} :

$$K_{zt} = \left[1 + \frac{K_e K_t}{K_h} \right]^{-2}$$

donde:

K_h = factor de reducción dependiente de la altura dado por la siguiente ecuación:

$$= e^{\left(\frac{fz}{H}\right)}$$

e = base de los logaritmos naturales = 2.718

K_e = constante del terreno indicada en la Tabla 2-4

K_t = constante del terreno indicada en la Tabla 2-5

f = factor de atenuación dependiente de la altura indicado en la Tabla 2-5

z = altura sobre el nivel del terreno en la base de la estructura

H = altura de la cresta sobre el terreno circundante

K_{zt} = 1.0 para la categoría topográfica 1. Para la categoría topográfica 5, K_{zt} se deberá basar en bibliografía reconocida o en resultados experimentales.

2.6.7 Factor de ráfaga

2.6.7.1 Estructuras de celosía autosoportadas o acarteladas

Para las estructuras de celosía autosoportadas cuya altura sea mayor o igual que 600 ft [183 m] el factor de ráfaga deberá ser igual a 1.00. Para las estructuras cuya altura sea menor o igual que 450 ft [137 m] el factor de ráfaga deberá ser igual a 0.85. Para las estructuras cuya altura esté comprendida entre 450 ft [137 m] y 600 ft [183 m] el factor de ráfaga se deberá determinar interpolando linealmente.

Estas condiciones se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$G_h = 0.85 + 0.15 \left[\frac{h}{150} - 3.0 \right] \quad h \text{ en pies}$$

$$G_h = 0.85 + 0.15 \left[\frac{h}{45.7} - 3.0 \right] \quad h \text{ en metros}$$

donde:

h = altura de la estructura

Nota: Para las estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras, la altura de la estructura, h, no deberá incluir la altura de la estructura que sirve de apoyo.

2.6.7.2 Mástiles atirantados

Para los mástiles atirantados el factor de ráfaga deberá ser igual a 0.85.

2.6.7.3 Estructuras tipo monoposte

Para las estructuras tipo monoposte el factor de ráfaga deberá ser igual a 1.10.

2.6.7.4 Estructuras instaladas sobre otras estructuras

Para el diseño de la resistencia y las uniones de las proyecciones tubulares o de celosía en voladizo, monopostes u otras estructuras similares (frecuencia fundamental menor que 1.1 Hertz) instaladas sobre mástiles atirantados, estructuras autoportantes de celosía o edificios flexibles (relación alto/ancho mayor que 5), el factor de ráfaga deberá ser igual a 1.10 para las proyecciones de celosía y 1.35 para las proyecciones tubulares.

Los factores de ráfaga para los mástiles atirantados y estructuras autoportantes de apoyo deberán ser como se indica en 2.6.7.1 o 2.6.7.2 usando las cargas del voladizo en base al factor de ráfaga para la estructura de apoyo.

Notas:

1. El diseño de las uniones deberá incluir el diseño de todos los elementos y componentes que transfieren las cargas de la proyección a los elementos principales de la estructura o candelabro de apoyo.
2. En el caso de las estructuras con proyecciones, la altura de la estructura deberá incluir la altura de la proyección.

2.6.8 Espesor de hielo de diseño

Al calcular el peso de hielo y las cargas de viento sobre hielo, el espesor de hielo de diseño, t_z , se deberá mayorar en función de la altura de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$t_z = 2.0 t_i | K_{iz} (K_{zt})^{0.35}$$

$$K_{iz} = \left[\frac{z}{33} \right]^{0.10} \leq 1.4 \quad z \text{ en pies}$$

$$K_{iz} = \left[\frac{z}{10} \right]^{0.10} \leq 1.4 \quad z \text{ en metros}$$

donde:

2.0 = factor de conversión para estado límite

t_z = espesor mayorado del hielo glaseado radial a la altura z

t_i = espesor de hielo de diseño

I = factor de importancia de la estructura de acuerdo con la Tabla 2-3

K_{iz} = factor de amplificación dependiente de la altura para el espesor de hielo

z = altura sobre el nivel del terreno en la base de la estructura

K_{zt} = factor topográfico de acuerdo con 2.6.6.4

Para el cálculo del área de hielo proyectada adicional se deberá considerar que el hielo se acumula con un espesor uniforme alrededor de las superficies expuestas de la estructura, las riendas y los accesorios (ver Figura 2-1). Para calcular las cargas de viento sobre hielo se podrá considerar que el área de hielo proyectada adicional es circular, aun cuando el área proyectada sin hielo sea plana.

Para el cálculo del peso del hielo el área de la sección transversal de hielo se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$A_{iz} = \pi \cdot t_z (D_c + t_z)$$

donde:

A_{iz} = área de la sección transversal de hielo a la altura z

D_c = mayor dimensión de extremo a extremo de un elemento (ver Figura 2-2)

El peso del hielo se deberá basar en un peso unitario de 56 lb/ft³ [8.8 kN/m³].

2.6.9 Carga de viento de diseño

La carga de viento de diseño deberá incluir la suma de las fuerzas de viento de diseño horizontales aplicadas a la estructura en la dirección del viento más las fuerzas de viento de diseño sobre las riendas y los accesorios. Se deberá asumir que todos los accesorios, incluyendo las antenas, soportes y cables, permanecerán intactos y unidos a la estructura.

El diseño por resistencia se deberá basar en las direcciones del viento que provoquen las máximas respuestas. En el caso de las estructuras de celosía, para cada cara se deberán considerar todas las direcciones indicadas en la Tabla 2-6.

La fuerza de viento de diseño horizontal para el diseño por resistencia de los accesorios y sus uniones a las estructuras de apoyo se deberá determinar usando un factor de ráfaga de 1.0 y un factor de direccionalidad determinado de acuerdo con la

Tabla 2-2. No se deberá considerar ningún blindaje por parte de la estructura ($K_a = 1.0$, ver 2.6.9.2).

La fuerza de viento de diseño horizontal para el diseño por resistencia de una proyección tubular o de celosía en voladizo, monoposte u otra estructura similar instalada sobre un mástil atirantado, estructura autoportante de celosía o edificio flexible se deberá determinar usando un factor de ráfaga según 2.6.7.4 y un factor de direccionalidad determinado de acuerdo con la Tabla 2-2 para la estructura en voladizo.

Nota: El factor de direccionalidad para determinar la carga de viento de diseño para la totalidad de la estructura, incluyendo el voladizo, se deberá determinar de acuerdo con la Tabla 2-2 en base al tipo de estructura de apoyo.

La fuerza de viento de diseño, F_w , se deberá determinar de la siguiente manera:

$$F_w = F_{ST} + F_A + F_G$$

donde:

F_{ST} = fuerza de viento de diseño sobre la estructura de acuerdo con 2.6.9.1

F_A = fuerza de viento de diseño sobre los accesorios de acuerdo con 2.6.9.2

F_G = fuerza de viento de diseño sobre las riendas de acuerdo con 2.6.9.3

No es necesario que las fuerzas de viento de diseño, $F_{ST} + F_A$, sean mayores que la fuerza de viento calculada para una estructura usando una relación de solidez de 1.0 (cara sólida) más la carga de viento sobre los accesorios montados externamente que estén fuera del área proyectada normal de la estructura en la dirección del viento.

2.6.9.1 Fuerza de viento de diseño sobre la estructura

La fuerza de viento de diseño, F_{ST} , aplicada a cada sección de una estructura se deberá determinar de la siguiente manera:

$$F_{ST} = q_z G_h (EPA)_s$$

donde:

F_{ST} = fuerza de viento de diseño horizontal sobre la estructura en la dirección del viento

q_z = presión dinámica de acuerdo con 2.6.9.6

G_h = factor de ráfaga de acuerdo con 2.6.7

$(EPA)_s$ = área proyectada efectiva de la estructura de acuerdo con 2.6.9.1.1 o 2.6.9.1.2

2.6.9.1.1 Área proyectada efectiva de las estructuras de celosía

El área proyectada efectiva, $(EPA)_s$, de los componentes estructurales de una sección se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_s = C_f [D_f \Sigma A_f + D_r \Sigma (A_r R_r)]$$

donde:

$C_f = 4.0\epsilon^2 - 5.9\epsilon + 4.0$ (secciones transversales cuadradas)

$C_f = 3.4\epsilon^2 - 4.7\epsilon + 3.4$ (secciones transversales triangulares)

ϵ = relación de solidez = $(A_f + A_r) / A_g$

A_f = área proyectada de los componentes estructurales planos en una cara de la sección

A_r = área proyectada de los componentes estructurales circulares en una cara de la sección, incluyendo el área proyectada del hielo sobre los componentes estructurales planos y circulares en una cara para aquellas combinaciones que incluyen cargas de hielo

A_g = área bruta de una cara como si dicha cara fuese sólida

D_f = factor de dirección del viento para componentes estructurales planos determinada de acuerdo con la Tabla 2-6

D_r = factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares determinada de acuerdo con la Tabla 2-6

R_r = factor de reducción para un elemento circular

= $0.57 - 0.14\epsilon + 0.86\epsilon^2 - 0.24\epsilon^3 \leq 1.0$ cuando $C < 32$ [4.4] y para todas las condiciones que incluyan hielo (flujo subcrítico)

= $0.36 + 0.26\epsilon + 0.97\epsilon^2 - 0.63\epsilon^3$ cuando $C > 64$ [8.7] para condiciones sin hielo (flujo supercrítico)

donde:

$$C = [I K_z K_{zT}]^{1/2} V D$$

I = factor de importancia de acuerdo con la Tabla 2-3

K_z = coeficiente de presión dinámica de acuerdo con 2.6.5.2

K_{zT} = factor topográfico de acuerdo con 2.6.6.4

V = velocidad básica del viento para la condición de carga investigada, mph
[m/s]

D = diámetro exterior del componente estructural sin hielo, ft [m]

Notas:

1. El área proyectada de los componentes estructurales deberá incluir el área proyectada de las placas de unión en la cara de una sección.
2. Para que un componente estructural sea considerado un componente estructural circular, los lados del componente a barlovento y sotavento deben tener un perfil circular. (Los perfiles en U o los elementos en forma de canal serán considerados como componentes estructurales planos.)
3. No es necesario incluir los elementos de arriostamiento en caras adyacentes ni las riostras interiores en el área proyectada de los componentes estructurales.
4. Para condiciones sin hielo, cuando $32 [4.4] \leq C \leq 64 [8.7]$, para determinar R_r se puede interpolar linealmente. Para condiciones con hielo, R_r se deberá basar en flujo subcrítico para todos los valores de C .
5. Cuando en un elemento estructural circular hay accesorios tales como pernos de cabeza plana u otras irregularidades similares, el factor de reducción para los elementos circulares, R_r , se deberá calcular de la siguiente manera:
 - (a) Si $R_a \leq 0.1$, se podrán despreciar las áreas proyectadas de los accesorios.
 - (b) Si $0.1 < R_a \leq 0.2$, el valor de R_r se deberá multiplicar por $1.0 + 3 (R_a - 0.1)$, y se podrán despreciar las áreas proyectadas de los accesorios.
 - (c) Si $R_a > 0.20$, o alternativamente para cualquier valor de R_a , se deberá usar el valor de R_r para flujo subcrítico. Las áreas proyectadas de los accesorios se deberán considerar separadamente además del elemento estructural usando coeficientes de fuerza apropiados para dichos accesorios.

Siendo R_a la relación entre el área proyectada de los accesorios y el área proyectada del elemento estructural sin los accesorios para la porción considerada. Para condiciones con hielo no es necesario incluir el espesor de hielo en la determinación de R_a .
6. Cuando en un elemento estructural plano hay accesorios tales como pernos de cabeza plana u otras irregularidades similares, las áreas proyectadas de los accesorios se deberán considerar separadamente además del elemento estructural usando coeficientes de fuerza apropiados para dichos accesorios, excepto cuando R_a sea menor o igual que 0.1, en cuyo caso las áreas proyectadas de los accesorios se podrán ignorar.

2.6.9.1.1 Área proyectada efectiva de las estructuras con patas reticuladas

Para los propósitos de la determinación del área proyectada efectiva, $(EPA)_S$, de las estructuras con patas reticuladas, las patas reticuladas se deberán considerar como elementos circulares equivalentes.

El área proyectada efectiva de una pata reticulada individual se deberá determinar de acuerdo con 2.6.9.1.1 con R_r basado en flujo subcrítico y los factores de dirección, D_r y D_r , iguales a 1.0. El diámetro del elemento circular equivalente se deberá determinar dividiendo la $(EPA)_S$ de la pata reticulada individual por 1.2 veces la longitud de la pata reticulada. El área bruta de la estructura, A_g , se deberá basar en el ancho total de la estructura incluyendo el ancho de la pata reticulada y el hielo cuando corresponda.

El factor de reducción, R_r , para el elemento circular equivalente se deberá basar en flujo subcrítico.

Para las condiciones de carga que incluyen hielo, para determinar las áreas proyectadas efectivas el espesor de hielo mayorado, t_{iz} , se deberá considerar uniformemente distribuido alrededor de cada elemento de la pata reticulada (no es necesario sumar el espesor del hielo al elemento circular equivalente). El peso del hielo se deberá determinar considerando cada elemento de la pata reticulada de acuerdo con 2.6.8.

2.6.9.1.2 Área proyectada efectiva de las estructuras tipo monoposte

El área proyectada efectiva, $(EPA)_S$, de una sección tipo monoposte se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_S = C_r A_p$$

donde:

C_r = coeficiente de fuerza para estructuras tipo monoposte en voladizo de acuerdo con la Tabla 2-7

A_p = área proyectada efectiva real en base al diámetro exterior del monoposte (secciones circulares), al diámetro exterior punto a punto (secciones poligonales) o al ancho total, incluyendo el espesor de hielo para las combinaciones de cargas que incluyen hielo

Nota: En ausencia de información detallada acerca de la disposición y radios de curvatura de las líneas de transmisión, el diámetro mínimo de una estructura tipo monoposte no deberá ser menor que el diámetro que resulte en una utilización del 45% de la sección transversal para la colocación de líneas de transmisión internas.

2.6.9.1.3 Carga uniforme de viento y hielo aplicada a la estructura

La fuerza de viento de diseño y el espesor de hielo aplicados a una sección de una estructura se pueden basar en la presión dinámica y el espesor de hielo a la mitad de la altura de la sección. La longitud de la sección que se considera tiene presión dinámica y espesor de hielo uniformes no deberá ser mayor que:

- a) 60 ft [18 m] para las estructuras de celosía
- b) 20 ft [6 m] para estructuras tipo monoposte

2.6.9.2 Fuerza de viento de diseño sobre los accesorios

La fuerza de viento de diseño sobre los accesorios (ya sean puntuales o lineales pero excluyendo las antenas de microondas), F_A , se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_A = q_z G_h (EPA)_A$$

donde:

q_z = presión dinámica a la altura del eje del accesorio de acuerdo con 2.6.9.6

G_h = factor de ráfaga de acuerdo con 2.6.7

(Nota: Ver el factor de ráfaga, G_h , para el diseño por resistencia de los accesorios en 2.6.9.)

$(EPA)_A$ = área proyectada efectiva del accesorio incluyendo el hielo para las combinaciones de carga que incluyen hielo.

La fuerza de viento de diseño, F_A , se deberá aplicar en el baricentro del área efectiva proyectada del accesorio en la dirección del viento. Para un accesorio lineal, la longitud que se considera tiene presión dinámica y espesor de hielo uniformes no deberá ser mayor que la longitud especificada en 2.6.9.1.3.

En ausencia de datos más precisos, la fuerza de viento de diseño sobre las antenas de microondas se deberá determinar usando el Anexo C.

En ausencia de datos más precisos que especifiquen los valores del área proyectada efectiva para cada una de las direcciones de viento críticas, el área proyectada efectiva, $(EPA)_A$, de un accesorio se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_A = K_a [(EPA)_N \cos^2(\theta) + (EPA)_T \sin^2(\theta)]$$

donde:

$K_a = 1.0$ para accesorios circulares, independientemente de su ubicación, cuando se consideren coeficientes de fuerza para flujo transicional o supercrítico

= $(1 - \epsilon)$ para accesorios cuando se consideren coeficientes de fuerza para flujo subcrítico, ubicados completamente dentro de la sección transversal de una estructura en celosía o fuera de la sección transversal completamente dentro de una zona de cara tal como se define en la Figura 2-3, siendo ϵ la mínima relación de solidez de la estructura considerando cada cara para la sección que contiene el accesorio. No es necesario que K_a sea mayor que 0.6.

= 0.8 para antenas y configuraciones para montaje de antenas (cuando se consideren solamente coeficientes de fuerza para flujo subcrítico) tales como brazos laterales, brazos en T, separadores, etc. cuando hay tres o más soportes ubicados a la misma altura relativa (se excluyen el blindaje provisto por la configuración de montaje y el blindaje de los elementos de montaje por parte de las antenas, ver 2.6.9.4)

= 1.0 para otros accesorios a menos que en la presente sección se especifique lo contrario

Notas:

1. De forma conservadora, se puede usar $K_a = 1.0$ para cualquier accesorio.
2. El valor de K_a es constante para todas las direcciones del viento.
3. Los valores de K_a arriba especificados no se deberán aplicar además de los valores de K_a aplicables especificados en las secciones 2.6.9.2.2 a 2.6.9.2.5.

θ = ángulo relativo entre el acimut asociado con la cara normal del accesorio y la dirección del viento (ver Figura 2-4)

$(EPA)_N$ = área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento normal al acimut del accesorio

$(EPA)_T$ = área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento del accesorio

De manera conservadora, se puede usar el mayor valor entre $(EPA)_N$ y $(EPA)_T$ como $(EPA)_A$ para todas las direcciones del viento.

En ausencia de datos más precisos, se deberá considerar que un accesorio está formado por componentes planos y circulares de acuerdo con lo siguiente:

$$(EPA)_N = \Sigma(C_a A_A)_N$$

$$(EPA)_T = \Sigma(C_a A_A)_T$$

C_a = coeficiente de fuerza de acuerdo con la Tabla 2-8

A_A = área proyectada de un componente del accesorio. Para las combinaciones de cargas que incluyen hielo, el área proyectada de hielo adicional se deberá considerar como un componente circular.

Las áreas de placa equivalente basadas en la Revisión C de esta Norma se deberán multiplicar por un coeficiente de fuerza, C_a , igual a 2.0 excepto cuando el accesorio está formado solamente por elementos circulares, en cuyo caso se podrá aplicar un coeficiente de 1.8.

Cuando no haya información específica disponible acerca de la antena y el soporte, el $(EPA)_A$ total para una montura de antenas inalámbricas se deberá determinar de acuerdo con el Anexo C.

2.6.9.2.1 Tubos de montaje para antenas

El área proyectada efectiva de un tubo de montaje por encima y por debajo de la porción blindada del tubo se deberá incluir en el término $\Sigma(C_a A_A)_N$. El área proyectada efectiva de la totalidad del tubo de montaje se deberá incluir en el término $\Sigma(C_a A_A)_T$.

2.6.9.2.2 Área proyectada efectiva para los marcos de montaje (Figura 2-5)

El área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento normal al acimut de un marco de montaje, $(EPA)_N$, se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_N = (EPA)_{MN} + (EPA)_{FN}$$

donde:

$$(EPA)_{MN} = \text{Área proyectada efectiva del marco} = C_{as} (A_f + R_{rf} A_r)$$

$$C_{as} = 1.58 + 1.05 (0.6 - \varepsilon)^{1.8} \text{ para } \varepsilon \leq 0.6$$

$$C_{as} = 1.58 + 2.63 (\varepsilon - 0.6)^{2.0} \text{ para } \varepsilon > 0.6$$

A_f = área proyectada de los componentes planos del marco de montaje

$$R_{rf} = 0.6 + 0.4 \varepsilon^2$$

ε = relación de solidez del marco de montaje sin antenas y tubos de montaje

$$= (A_f + A_r)/A_g$$

A_r = área proyectada de los componentes circulares del marco de montaje

A_g = área bruta del marco como si fuera macizo, definida por las mayores dimensiones exteriores de los elementos incluidos en A_f y A_r

Nota: Para los marcos de montaje cuadrados o rectangulares de celosía (ver Figura 2-5), C_{as} deberá ser igual a C_r de acuerdo con 2.6.9.1.1.

$(EPA)_{FN}$ = área proyectada efectiva en un plano paralelo a la cara del marco de montaje de todos los elementos que soportan el marco de montaje

$$= 0.5 [2.0 (\Sigma A_{fs}) + 1.2 (\Sigma A_{rs})]$$

A_{fs} = área proyectada de los componentes planos que soportan el marco de montaje sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos

A_{rs} = área proyectada de los componentes circulares que soportan el marco de montaje sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos

El área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento de un marco de montaje, $(EPA)_T$, se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_T = (EPA)_{FT} + 0.5 \Sigma(EPA)_{FTI} + 0.5 \Sigma(EPA)_{MT}$$

donde:

$(EPA)_{FT}$ = área proyectada efectiva en un plano transversal a la cara del marco de montaje de un pórtico/celosía que soporta el marco de montaje (si hay más de uno, el mayor de los pórticos/celosías)

$(EPA)_{FTI}$ = área proyectada efectiva en un plano transversal a la cara del marco de montaje de cualquier pórtico/celosía adicional que soporte el marco de montaje

Nota: El área proyectada efectiva de los elementos de apoyo tipo pórtico/celosía se deberá determinar de acuerdo con la ecuación para $(EPA)_{MN}$. Alternativamente, se puede aplicar un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 2.0 a los elementos planos y un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 1.2 a los elementos circulares sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos.

$(EPA)_{MT}$ = área proyectada efectiva, en un plano transversal a la cara del marco de montaje, de todos los elementos del marco de montaje y todos los demás elementos de apoyo (por ejemplo retenidas) sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos, determinada usando un coeficiente de resistencia aerodinámica de 2.0 para los elementos planos y un coeficiente de resistencia aerodinámica de 1.2 para los elementos circulares

Cuando hay tres o más marcos de montaje instalados a la misma altura relativa se puede aplicar un factor de blindaje, K_b , de 0.80 a los valores de $(EPA)_N$ y $(EPA)_T$ del marco de montaje. Cuando hay tres o más marcos de montaje instalados en una disposición tal que resulta en el blindaje de la estructura y de los demás marcos de montaje (ver Figura 2-6), el factor de blindaje, K_b , se puede reducir a un valor igual a 0.75. Para la estructura de apoyo no se deberá considerar ningún blindaje.

Las antenas y tubos de montaje instaladas sobre marcos de montaje deberán ser considerados como accesorios genéricos usando un valor de K_b igual a 0.9, excepto que se podrá usar un valor de K_b igual a 0.8 cuando haya 3 o más marcos de montaje instalados a la misma altura relativa.

2.6.9.2.3 Área proyectada efectiva para plataformas simétricas tipo pórtico/celosía

El área proyectada efectiva, $(EPA)_A$, de las plataformas simétricas tipo pórtico/celosía triangulares o cuadradas (ver Figura 2-7) que son continuas alrededor del perímetro de una estructura (o en las cuales la luz horizontal entre las esquinas de las caras adyacentes es menor o igual que 10% del ancho de la plataforma) se deberá determinar como si la plataforma fuera una sección de una estructura de celosía de acuerdo con 2.6.9.1 usando factores de direccionalidad D_F y $D_T = 1.0$. El área proyectada de todos los elementos de apoyo para toda la plataforma se deberá determinar proyectando todos los elementos de apoyo sobre un plano paralelo a una cara sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos de la plataforma ni de la estructura de apoyo. A las áreas proyectadas de los elementos de apoyo se les deberá aplicar un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 2.0 para los elementos planos y un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 1.2 para los elementos circulares. Al área proyectada efectiva de la plataforma se le deberá sumar el 50 por ciento del área proyectada efectiva total de los elementos de apoyo. El área proyectada efectiva total resultante se deberá usar para todas las direcciones del viento. Para la estructura de apoyo no se deberá considerar ningún blindaje. Las antenas y tubos de montaje instalados sobre la plataforma deberán ser considerados como accesorios genéricos usando un valor de K_b igual a 0.75.

2.6.9.2.4 Área proyectada efectiva para plataformas de bajo perfil

El área proyectada efectiva, $(EPA)_A$, de las plataformas simétricas de bajo perfil (ver Figura 2-8) que son continuas alrededor del perímetro de una estructura (o en las cuales luz horizontal entre las esquinas de las caras adyacentes es menor o igual que 10% del ancho de la plataforma) se deberá determinar sumando las áreas proyectadas de todos los elementos de la plataforma sobre un plano paralelo a una cara de la plataforma sin considerar el blindaje ni los elementos ni superpuestos de la plataforma ni de la estructura de apoyo. A las áreas proyectadas de todos los elementos se les deberá aplicar un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 2.0 para los elementos planos y un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 1.2 para los elementos circulares. El área efectiva total se deberá multiplicar por un factor igual a 0.75 para las plataformas cuadradas e igual a 0.67 para las plataformas triangulares. El área proyectada efectiva resultante se deberá usar para todas las direcciones del viento. Para la estructura de apoyo no se deberá considerar ningún blindaje. Las

antenas y tubos de montaje instalados sobre la plataforma deberán ser considerados como accesorios genéricos usando un valor de K_b igual a 0.8.

2.6.9.2.5 Área proyectada efectiva para plataformas simétricas en forma de anillo circular

El área proyectada efectiva, $(EPA)_A$, de las plataformas simétricas en forma de anillo circular (ver Figura 2-9) que son continuas alrededor del perímetro de una estructura se deberá determinar considerando los elementos de apoyo de la plataforma y los elementos del anillo como elementos individuales. El área proyectada de cada elemento del anillo deberá ser igual al producto entre el diámetro del anillo y la dimensión vertical proyectada del elemento del anillo expuesto al viento. El área proyectada de todos los elementos de apoyo para toda la plataforma se deberá determinar proyectando todos los elementos de apoyo sobre un plano vertical sin considerar el blindaje ni los elementos superpuestos de la plataforma ni de la estructura de apoyo. A las áreas proyectadas de los elementos de apoyo y los elementos del anillo se les deberá aplicar un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 2.0 para los elementos planos y un coeficiente de resistencia aerodinámica igual a 1.2 para los elementos circulares. Al área proyectada efectiva total de los elementos de apoyo se le deberá aplicar un factor de 0.50, mientras que al área efectiva proyectada total de los elementos del anillo se le deberá aplicar un factor de 1.75. El área proyectada efectiva total resultante se deberá usar para todas las direcciones del viento. Para la estructura de apoyo no se deberá considerar ningún blindaje. Las antenas y tubos de montaje instalados sobre la plataforma deberán ser considerados como accesorios genéricos usando un valor de K_b igual a 0.8.

Notas para todos los tipos de plataformas/marcos de montaje:

1. Para las antenas y los tubos de montaje para antenas bajo condiciones de flujo transicional o supercrítico K_b deberá ser igual a 1.0.
2. No es necesario incluir las rejillas y otras superficies de trabajo horizontales en el área proyectada efectiva.

2.6.9.3 Fuerza de viento de diseño sobre las riendas

La fuerza de viento de diseño sobre las riendas, F_G , se deberá determinar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_G = C_d d L_G G_h q_z \sin^2 \theta_g$$

donde:

F_G = fuerza aplicada normal a la cuerda de la rienda en el plano que contiene a la cuerda y al viento, ver Figura 2-10

C_d = 1.2, coeficiente de resistencia aerodinámica para riendas

d = diámetro de la rienda incluyendo el hielo para las combinaciones de carga que incluyen hielo

L_G = longitud de la rienda

G_n = factor de ráfaga de acuerdo con 2.6.7.2

q_z = presión dinámica a la mitad de la altura de la rienda de acuerdo con 2.6.9.6

θ_g = ángulo verdadero de incidencia del viento respecto de la cuerda de la rienda

Nota: Si hay accesorios tales como deflectores, aisladores, marcadores, etc. fijados a una rienda, es posible que se requiera un coeficiente de resistencia aerodinámica, C_d , más elevado o un mayor diámetro de rienda efectivo.

Se puede suponer que la fuerza de viento de diseño y el espesor de hielo son uniformes en base a la presión dinámica y el espesor de hielo a la mitad de la altura de cada rienda o segmento de rienda. La longitud de cada rienda o segmento de rienda se puede suponer igual a la longitud de la cuerda. La fuerza de viento de diseño se deberá considerar como una fuerza distribuida normal a la cuerda de la rienda.

En el caso de las estructuras apoyadas directamente sobre el terreno, la mitad de la altura se deberá medir con referencia a la cota del terreno en la base de la estructura. En el caso de las estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras de apoyo, la mitad de la altura de una rienda se deberá medir desde la cota a la mitad de la altura de la rienda hasta el nivel de piso del edificio u otra estructura de apoyo. La altura, z , de un segmento de rienda nunca deberá ser menor que cero.

2.6.9.4 Blindaje

Con las excepciones aquí especificadas, se podrá considerar blindaje para los elementos que se intersecan o son paralelos. A menos que ambos elementos sean circulares, el elemento no blindado deberá ser considerado como plano. Se puede considerar que existe blindaje total cuando la distancia libre entre los elementos en la dirección considerada para determinar las áreas proyectadas efectivas (EPA) es menor o igual que 2.0 veces la menor dimensión proyectada del elemento en la dirección considerada. Cuando la relación de la distancia libre es mayor que 4.0 no se deberá considerar ningún blindaje. Para relaciones comprendidas entre 2.0 y 4.0 estará permitido interpolar linealmente. Ver Figura 2-11.

No se deberá considerar el blindaje ofrecido por un accesorio cuando para determinar la fuerza de viento de diseño sobre el accesorio se utilice un valor de K_a menor que 1.0 de acuerdo con 2.6.9.2.

Nota: Las consideraciones referentes al blindaje variarán dependiendo de la dirección del viento.

2.6.9.5 Líneas de transmisión instaladas en grupos o bloques

El área proyectada de cada una de las líneas que forma parte de un grupo o bloque, independientemente de su separación o ubicación dentro del grupo (es decir sin considerar el blindaje de las líneas ni la reducción del espesor de hielo) se deberá incluir en el cálculo de las cargas de viento usando un coeficiente de fuerza, C_a , igual a 1.2 (líneas circulares o elípticas), excepto que no es necesario considerar al grupo de líneas mayor que un accesorio equivalente con un ancho igual a la máxima dimensión de extremo a extremo del grupo tanto para las caras normales como para las caras transversales con un coeficiente de fuerza, C_a , igual a 1.5 para los grupos cuadrados o rectangulares y 1.2 para los grupos circulares. Ver Figura 2-12. Para las condiciones de carga que incluyen hielo se deberá aplicar un coeficiente de fuerza, C_a , igual a 1.5 para los grupos circulares, cuadrados y rectangulares.

Nota: Para determinar el blindaje de acuerdo con 2.6.9.4 se puede usar el ancho del accesorio equivalente.

Para los propósitos del cálculo del peso de hielo se deberá considerar el espesor radial del hielo en cada línea individual, excepto que no es necesario que la sección transversal total de hielo sea mayor que el área de un grupo tal como se ilustra en la Figura 2-12.

2.6.9.6 Presión dinámica

La presión dinámica, q_z , evaluada a la altura z se deberá calcular de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.00256 K_z K_{zt} K_d V^2 I \text{ (lb/ft}^2\text{)}$$

$$= 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \text{ [N/m}^2\text{]}$$

donde:

K_z = coeficiente de presión dinámica de acuerdo con 2.6.5.2

K_{zt} = factor topográfico de acuerdo con 2.6.6.4

K_d = factor de probabilidad de la dirección del viento de acuerdo con la Tabla 2-2

V = velocidad básica del viento para la condición de carga investigada, mph [m/s]

I = factor de importancia de acuerdo con la Tabla 2-3

2.7 Cargas sísmicas

2.7.1 Definiciones

Terremoto de diseño: Efectos sísmicos correspondientes a dos tercios del terremoto máximo considerado.

2.8 Requisitos de serviciabilidad

2.8.1 Definiciones

Desplazamiento: Desplazamiento horizontal bajo cargas de servicio de un punto respecto de su posición correspondiente a carga no mayorada sin viento.

Cargas de servicio: Combinación de cargas que se utiliza para calcular las deformaciones en estado límite de servicio.

Ladeo: Rotación angular bajo cargas de servicio del recorrido del haz de una antena en el plano vertical local de la antena respecto de su posición correspondiente a carga sin viento no mayorada.

Torsión: Rotación angular bajo cargas de servicio del recorrido del haz de una antena en el plano horizontal local de la antena respecto de su posición correspondiente a carga sin viento no mayorada.

2.8.2 Deformaciones en estado límite

A menos que se requiera lo contrario, en ningún punto de una estructura las deformaciones bajo cargas de servicio deberán superar los siguientes límites:

1. Una rotación de 4 grados respecto del eje vertical (torsión) o de cualquier eje horizontal (ladeo) de la estructura.
2. Un desplazamiento igual al 3% de la altura de la estructura.
3. Para las proyecciones tubulares o de celosía en voladizo, monopostes o estructuras similares instaladas sobre estructuras de celosía, un desplazamiento horizontal relativo igual a 1.5% de la altura del voladizo medida desde la punta del voladizo hasta su base.

2.8.3 Cargas de servicio

Las cargas de servicio se deberán definir de acuerdo con la siguiente combinación de cargas para una velocidad básica del viento de 60 mph [27 m/s]:

$$1.0 D + 1.0 D_o + 1.0 W_o \quad (\text{Ver 2.3.1})$$

Las fuerzas de viento horizontales para determinar las cargas de servicio se deberán basar en un factor de importancia, I , de 1.00, y un factor de direccionalidad, K_d , de 0.85 para todas las estructuras. El coeficiente de presión dinámica, K_z , el factor de ráfaga, G_n , y el factor topográfico, K_{zt} , deberán ser iguales a los valores para la condición correspondiente al estado límite de resistencia.

Tabla 2-1
Clasificación de las estructuras

Descripción de la estructura	Clase
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo bajo en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras utilizadas para servicios opcionales y/o en las cuales una demora en el restablecimiento de los servicios sería aceptable.	I
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo considerable en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras que se utilizan para servicios que se pueden prestar por otros medios.	II
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo elevado en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras que se utilizan principalmente para comunicaciones esenciales.	III

Tabla 2-2
Factor de probabilidad de la dirección del viento

Tipo de estructura	Factor de probabilidad de la dirección del viento, K_d
Estructuras de celosía con secciones transversales triangulares, cuadradas o rectangulares incluyendo los accesorios	0.85
Estructuras tubulares tipo monoposte; estructuras de celosía con secciones transversales que no sean triangulares, cuadradas ni rectangulares; diseño por resistencia de los accesorios	0.95

Tabla 2-3
Factores de importancia

Clase de la estructura	Carga de viento sin hielo	Carga de viento con hielo	Espesor de hielo	Sismo
I	0.87	N/A	N/A	N/A
II	1.00	1.00	1.00	1.00
III	1.15	1.00	1.25	1.50

Nota: Las cargas de hielo y las cargas sísmicas no se aplican a las estructuras de la Clase I

Tabla 2-4
Coeficientes según la categoría de exposición

Categoría de exposición	Z _g	α	K _{zmin}	K _e
B	1200 ft [366 m]	7.0	0.70	0.90
C	900 ft [274 m]	9.5	0.85	1.00
D	700 ft [213 m]	11.5	1.03	1.10

Tabla 2-5
Coeficientes de categoría topográfica

Categoría topográfica	K _t	f
2	0.43	1.25
3	0.53	2.00
4	0.72	1.50

Tabla 2-6
Factores de dirección del viento

Sección transversal de la torre	Cuadrada		Triangular		
	Normal	45°	Normal	60°	±90°
D _f	1.0	1 + 0.75ε (1.2 máx.)	1.0	0.80	0.85
D _r	1.0	1 + 0.75ε (1.2 máx.)	1.0	1.0	1.0

Las direcciones del viento se miden respecto de una línea normal a la cara de la estructura.

Tabla 2-7
Coeficientes de fuerza (C_F) para las estructuras tipo monoposte

C mph-ft [m/s-m]	Circular	18 lados	16 lados	12 lados	8 lados
< 32 [4.4] (flujo subcrítico)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
32 a 64 [4.4 a 8.7] (flujo transicional)	38.4 / (C) ^{1.0} [5.23 / (C) ^{1.0}]	25.8 / (C) ^{0.885} [4.42 / (C) ^{0.885}]	12.6 / (C) ^{0.678} [3.26 / (C) ^{0.678}]	2.99 / (C) ^{0.263} [1.77 / (C) ^{0.263}]	1.2 [1.2]
> 64 [8.7] (flujo supercrítico)	0.60	0.65	0.75	1.0	1.2

$$C = (I K_{zt} K_z)^{0.5} (V)(D) \quad \text{para } D \text{ en ft [m], } V \text{ en mph [m/s]}$$

V es la velocidad básica del viento para la condición de carga investigada. D es el diámetro externo del poste para el caso de postes circulares o el diámetro exterior punto a punto para el caso de postes poligonales.

Notas:

- Quando hay accesorios lineales tales como escaleras, guías de onda, coaxiales, ménsulas u otras proyecciones similares unidas a la parte exterior del fuste del monoposte, las áreas proyectadas efectivas se deberán calcular de la siguiente manera:
 - Cuando $R_a \leq 0.1$ se podrán despreciar las áreas proyectadas de los accesorios.
 - Cuando $0.1 < R_a \leq 0.2$, el valor para C_F se deberá multiplicar por $1.0 + 3(R_a - 0.1)$ y se podrán despreciar las áreas proyectadas de los accesorios.
 - Cuando $R_a > 0.2$, o alternativamente para cualquier valor de R_a, se deberá usar el valor de C_F para flujo subcrítico. Las áreas proyectadas de los accesorios se deberán considerar separadamente además de la estructura usando coeficientes de fuerza apropiados para dichos accesorios.

R_a es la relación entre el área proyectada de los accesorios (perpendicular a la dirección del viento) y el área proyectada de la estructura sin accesorios para la porción considerada. Para condiciones con hielo no es necesario incluir el espesor de hielo en la determinación de R_a.
- Para condiciones con hielo, C_F se deberá basar en flujo subcrítico para todos los valores de C.
- Para otras secciones triangulares se podrá interpolar linealmente entre los valores indicados en base al ángulo inscrito de cada lado. Para una sección transversal circular el ángulo inscrito es de 0 grados.

Tabla 2-8
Coefficientes de fuerza (C_a) para los accesorios

Tipo de elemento		Relación de aspecto ≤ 2.5	Relación de aspecto = 7	Relación de aspecto ≥ 25
		C_a	C_a	C_a
Plano		1.2	1.4	2.0
Circular	C < 32 [4.4] (flujo subcrítico)	0.70	0.80	1.2
	32 \leq C \leq 64 [4.4 \leq C \leq 8.7] (flujo transicional)	3.76 / (C) ^{0.485} [1.43 / (C) ^{0.485}]	3.37 / (C) ^{0.415} [1.47 / (C) ^{0.415}]	38.4 / (C) ^{1.0} [5.23 / (C) ^{1.0}]
	C > 64 [8.7] (flujo supercrítico)	0.50	0.60	0.60

Donde:

$$C = (I K_{z1} K_{z2})^{0.5} (V)(D) \text{ para } D \text{ en ft [m], } V \text{ en mph [m/s]}$$

V es la velocidad básica del viento para la condición de carga investigada.

D es el diámetro exterior del accesorio.

Relación de aspecto es la relación largo/ancho global en el plano normal a la dirección del viento. (La relación de aspecto es independiente de la separación entre puntos de apoyo de un accesorio lineal, y de la longitud de la sección que se considera tiene carga de viento uniforme).

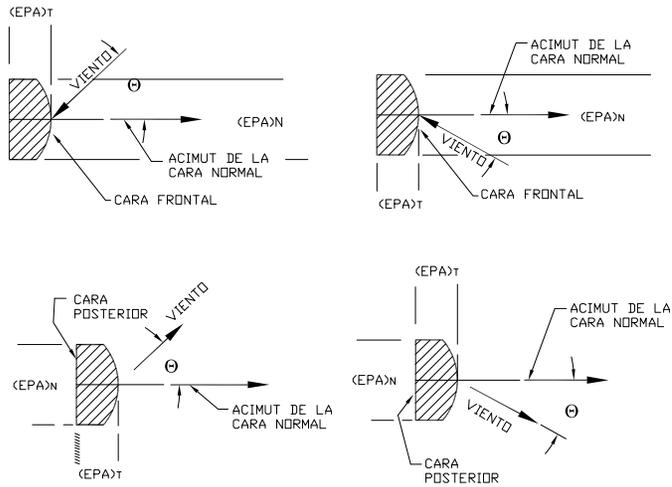
Notas:

1. Para los accesorios cilíndricos, cuando haya irregularidades tales como bridas, suspensores, etc. presentes, las áreas proyectadas efectivas se deberán calcular de la siguiente manera:
 - a. Cuando $R_a \leq 0.1$ se podrán despreciar las áreas proyectadas de las irregularidades.
 - b. Cuando $0.1 < R_a \leq 0.2$, el valor para C_a se deberá multiplicar por $1.0 + 3(R_a - 0.1)$ y se podrán despreciar las áreas proyectadas de las irregularidades.
 - c. Cuando $R_a > 0.2$, o alternativamente para cualquier valor de R_a , se deberá usar el valor de C_a para flujo subcrítico. Las áreas proyectadas de las irregularidades se deberán considerar separadamente además del accesorio usando coeficientes de fuerza apropiados.

R_a es la relación entre el área proyectada de las irregularidades (perpendicular a la dirección del viento) y el área proyectada del accesorio sin las irregularidades para la porción considerada. Para condiciones con hielo no es necesario considerar el espesor de hielo en la determinación de R_a .
2. Para los accesorios planos, cuando haya irregularidades tales como bridas, suspensores, etc., presentes, el área proyectada de las irregularidades se deberá

considerar separadamente además del accesorio usando coeficientes de fuerza apropiados, excepto cuando R_a sea menor o igual que 0.1, en cuyo caso las áreas proyectadas de las irregularidades se podrán ignorar.

3. Para condiciones con hielo, C_a se deberá basar en flujo subcrítico para todos los valores de C.
4. Para relaciones de aspecto diferentes a las indicadas se podrá interpolar linealmente.
5. De manera conservadora, para cualquier valor de C se pueden utilizar coeficientes de fuerza para flujo subcrítico.



NOTA: $(EPA)_N$ Y $(EPA)_T$ REPRESENTAN LAS ÁREAS PROYECTADAS EFECTIVAS DEL ACCESORIO PARA LAS CARAS A BARLOVENTO NORMAL Y TRANSVERSAL DEL ACCESORIO

Figura 2-4: Fuerza de viento sobre los accesorios

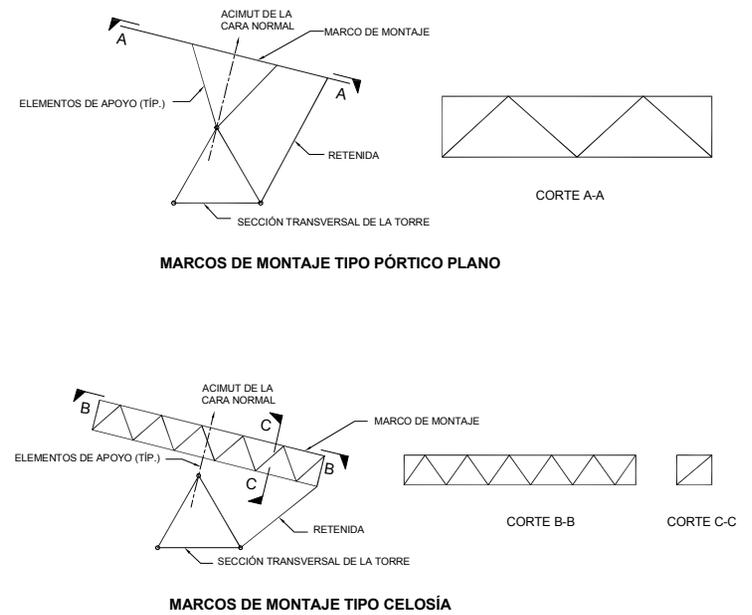


Figura 2-5: Marcos de montaje

3.0 ANÁLISIS

3.1 Alcance

Esta sección define: (i) los modelos y técnicas de análisis mínimos aceptables y (ii) los requisitos para tomar en cuenta los efectos dinámicos de las ráfagas de viento.

3.2 Definiciones

Para los propósitos de esta Norma se aplicarán las siguientes definiciones.

Mástil atirantado: Estructura de celosía o tipo monoposte con tirantes o riendas de soporte.

Tramo de un mástil: Distancia entre la base y el primer nivel de riendas, distancia entre dos niveles de riendas sucesivos, o distancia entre el nivel de riendas superior y la punta de la estructura (tramo en voladizo).

Factor de conversión para determinar el viento promedio, m: Factor que se utiliza para obtener la presión horaria promedio del viento.

3.3 Simbología y notación

F_A = fuerza de viento de diseño para los accesorios;

F_{ST} = fuerza de viento de diseño horizontal sobre la estructura;

f_{wi} = ancho de un segmento de una estructura;

h = altura de un mástil atirantado;

h_i = altura de un segmento de una estructura;

m = factor de conversión para determinar el viento promedio;

$P-\Delta$ = efectos del desplazamiento sobre las fuerzas en los elementos; presión dinámica.

3.4 Modelos de análisis

Los modelos de análisis mínimos aceptables son los siguientes:

(a) Torres de celosía autosoportadas

1. Modelo tridimensional elástico de reticulados formado por elementos rectos con uniones articuladas que solo producen fuerzas axiales en los elementos.

Modelo tridimensional elástico de pórticos y reticulados en el cual los elementos continuos (puntales, horizontales con disposición en "K" sin

arriostramiento en el plano) se modelan como elementos 3D tipo viga que producen tanto momentos como fuerzas axiales en los elementos, mientras que los elementos restantes –los cuales están sujetos fundamentalmente a cargas axiales– se pueden modelar como elementos 3D de reticulado que producen solo fuerzas axiales en los elementos.

(b) Estructuras autosoportadas tipo monoposte

Modelo tridimensional elástico de vigas y columnas que produce momentos, cortes y fuerzas axiales en la estructura tipo monoposte. A menos que el modelo de análisis considere los efectos secundarios dentro de cada elemento, el número mínimo de elementos tipo viga deberá ser igual a cinco por cada sección de poste y la máxima longitud de los elementos tipo viga no deberá ser mayor que 6 ft [1.8 m].

Nota: Debido a la complejidad que implica la generación de modelos de placas o cáscaras (por ejemplo, el mallado, la interconexión de los elementos, etc.), las tensiones obtenidas de tales modelos no deberán ser menores que las tensiones obtenidas mediante el modelo de vigas y columnas arriba indicado.

(c) Mástiles atirantados

1. Modelo tridimensional elástico de vigas y columnas en el cual el mástil se modela en forma de elementos tridimensionales tipo viga y columna equivalentes soportados por cables representados ya sea como apoyos elásticos no lineales o bien como elementos tipo cable. Este análisis produce momentos, cortes y fuerzas axiales en el mástil, los cuales producen fuerzas en los elementos individuales.
2. Modelo tridimensional elástico de reticulados en el cual los elementos individuales del mástil se modelan como elementos rectos conectados mediante nudos que solo producen fuerzas axiales en los elementos. Los cables se representan como elementos tipo cable.
3. Modelo tridimensional elástico de pórticos y reticulados en el cual los elementos continuos (puntales) del mástil se modelan como elementos 3D tipo viga que producen tanto momentos como fuerzas axiales en los elementos, mientras que los demás elementos se pueden modelar como elementos 3D de celosía. Los cables se representan como elementos tipo cable.

3.4.1 Aplicación de las fuerzas de viento a las estructuras de celosía

En los modelos tridimensionales de reticulados o de pórticos y reticulados la fuerza de diseño horizontal que actúa sobre la estructura, F_{ST} , se deberá distribuir igualmente a cada unión de un puntal de la sección transversal en los puntos de panel.

La fuerza de diseño horizontal, F_A , para los accesorios se deberá distribuir a cada unión de un puntal de acuerdo con la ubicación del accesorio (es decir, considerando la carga lateral y la torsión).

Para los componentes estructurales que soportan accesorios en la mitad central del componente se deberá considerar la flexión localizada. Para los elementos de arriostamiento principales, bajo esta condición, se deberá considerar la flexión localizada para la condición de viento normal al plano de los elementos de arriostamiento sin considerar ninguna carga axial en los elementos.

Nota: El peso y las fuerzas sísmicas se deberán distribuir y considerar de forma similar.

3.5 Efectos del desplazamiento

Excepto que en la presente se especifique lo contrario, el análisis de todas las estructuras deberá tomar en cuenta los efectos de los desplazamientos sobre las fuerzas que actúan en los elementos (efectos P- Δ). Para las estructuras atriantadas se deberán considerar los efectos de los desplazamientos de los puntos de arriostamiento, así como los efectos de los desplazamientos entre los diferentes puntos de arriostamiento. Para los modelos de vigas y columnas usados para realizar análisis por elementos finitos, a menos que el modelo de análisis considere los efectos de segundo orden dentro de cada elemento, el número mínimo de elementos tipo viga entre niveles de riostras deberá ser igual a cinco. No es necesario considerar los efectos P- Δ para las torres de celosía autosoportadas de menos de 450 ft [137 m] de altura, siempre que las relaciones entre la altura y el ancho de cara, h_i/f_{wi} sean menores que 10 tal como se ilustra en la Figura 3-1.

3.6 Patrones de carga de viento

A fin de tomar en cuenta los efectos dinámicos de las ráfagas de viento, para el estado límite de resistencia se deberán considerar los siguientes patrones de cargas de viento (ver Figuras 3-2 y 3-3):

3.6.1 Torres de celosía autosoportadas

Cuando el vértice definido por la prolongación de los puntales inclinados de una torre de celosía autosoportada se encuentre dentro de la altura de la torre (ver Figura 3-2), se deberán investigar los siguientes patrones de carga de viento para la combinación de cargas 1 de acuerdo con lo especificado en 2.3.2 variando la presión dinámica de la siguiente manera:

1. Presión dinámica total en toda la altura de la estructura.
2. Presión dinámica total por debajo del punto correspondiente al vértice y presión dinámica media por encima del punto correspondiente al vértice.
3. Presión dinámica total por encima del punto correspondiente al vértice y presión dinámica media por debajo del punto correspondiente al vértice.

La presión dinámica media se deberá determinar multiplicando la presión dinámica (q_z de acuerdo con 2.6.9.6) por el factor de conversión para determinar el viento promedio, m , de acuerdo con la Tabla 3-1.

En las torres en las cuales secciones adyacentes tengan puntales con pendientes que difieran en más de 1 grado, los patrones de carga arriba listados se deberán aplicar para cada uno de los vértices. Al determinar las máximas solicitaciones se deberán considerar todas las combinaciones de patrones de carga de viento.

3.6.2 Mástiles atriantados

Para los mástiles atriantados de tres o más tramos y que tienen al menos un tramo mayor que 80 ft [24 m] dentro del tercio superior de la altura de la estructura se deberán investigar los siguientes patrones de carga de viento (ver Figura 3-3) para la combinación de cargas 1 de acuerdo con lo especificado en 2.3.2, variando la presión dinámica de la siguiente manera:

1. Presión dinámica total en toda la altura de la estructura. Para los mástiles de más de 450 ft [137 m] de altura no es necesario considerar la presión total del viento en toda la estructura al investigar los patrones de carga.
2. Presión dinámica media en el tramo superior del mástil y presión dinámica total en el resto de los tramos.
3. Presión dinámica media en el segundo tramo del mástil contando desde su parte superior y presión dinámica total en el resto de los tramos.
4. Presión dinámica media en el tercer tramo del mástil contando desde su parte superior y presión dinámica total en el resto de los tramos.

La presión dinámica media se deberá determinar multiplicando la presión dinámica (q_z de acuerdo con 2.6.9.6) por el factor de conversión para determinar el viento promedio, m , de acuerdo con la Tabla 3-1. Para todos los patrones de carga, a las riendas se les deberá aplicar toda la presión del viento.

Notas:

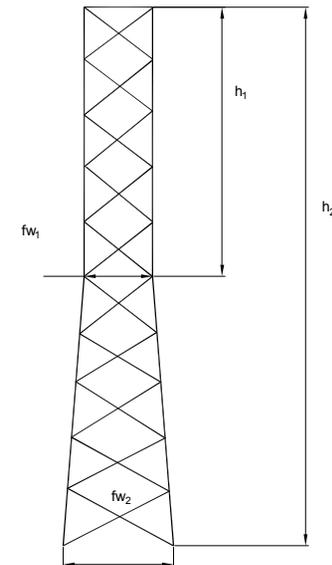
1. En el caso de los mástiles con voladizos (por ejemplo estructuras para antenas de transmisión, proyecciones o el propio mástil), los voladizos se deberán considerar el tramo superior.
2. En el caso de los mástiles en los cuales la longitud total de los tres tramos superiores del mástil es menor que un tercio de la altura de la estructura, los patrones de carga de viento arriba descritos se deberán continuar para cada tramo subsiguiente hasta que la longitud total de los tramos considerados sea mayor que un tercio de la altura de la estructura (ver Figura 3-3).
3. Cuando la distancia entre dos niveles de riendas sea menor que 3 veces el mayor ancho de cara entre los niveles de riendas, los patrones de presión de viento se deberán prolongar hasta el punto medio entre los dos niveles de riendas. Para los propósitos de esta sección, el tramo corto no se deberá considerar como un tramo independiente.

3.7 Corte en el mástil y respuestas torsionales para mástiles atirantados

Para todos los mástiles de celosía, el corte en la cara del mástil en un tramo que no esté en voladizo debido al corte y la torsión del mástil no deberá ser menor que 40% del máximo valor absoluto del corte en la cara en el tramo. Para todos los mástiles tubulares, el corte en el mástil en un tramo que no sea en voladizo no deberá ser menor que 40% del máximo valor absoluto del corte en el tramo.

Tabla 3-1: Factor de conversión para determinar el viento promedio

Categoría de exposición	Factor de conversión para determinar el viento promedio (m)
B	0.55
C	0.60
D	0.65



Nota: Máx. relación $\frac{\text{altura}}{\text{ancho de cara}} = \text{máx. valor entre } \frac{h_1}{fw_1} \text{ y } \frac{h_2}{fw_2}$

Figura 3-1: Relaciones altura/ancho

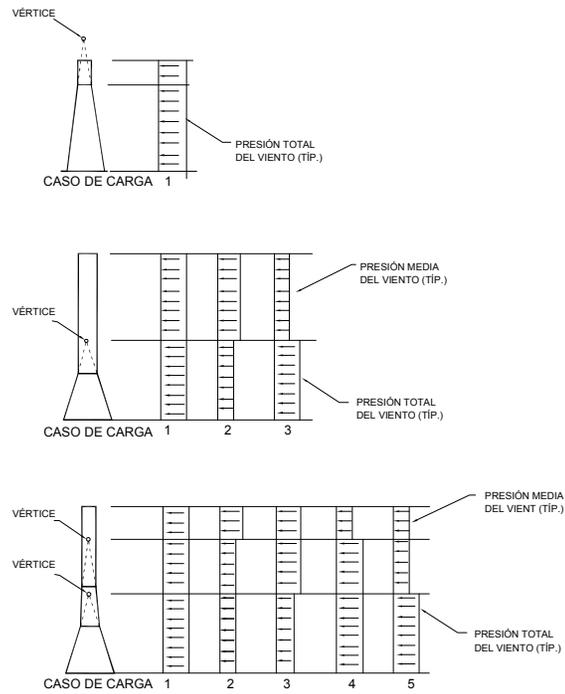


Figura 3-2: Patrones de carga para torres autoportadas

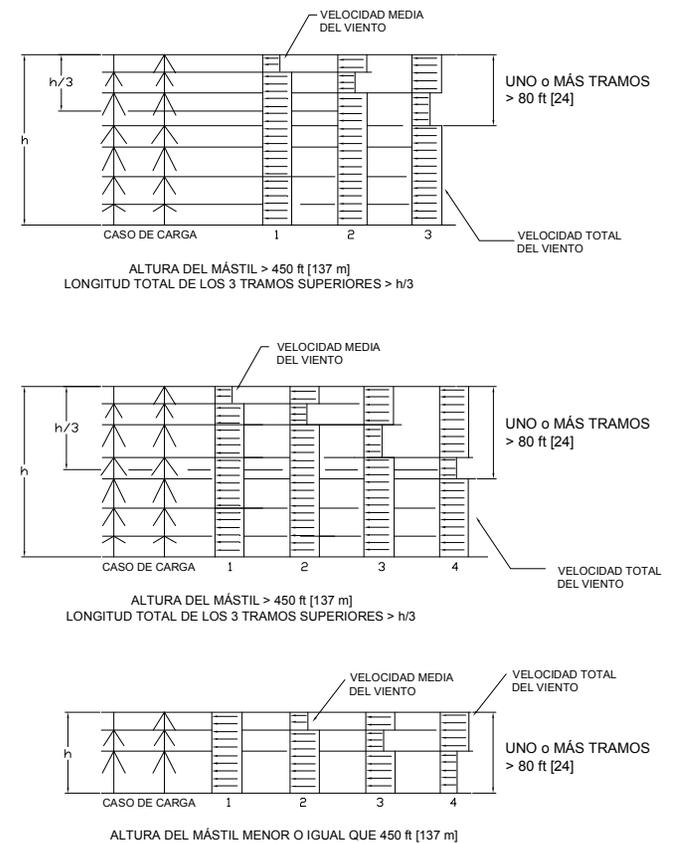


Figura 3-3: Patrones de carga para mástiles atirantados

4.0 RESISTENCIA DE DISEÑO DEL ACERO ESTRUCTURAL

4.1 Alcance

Esta sección se refiere al diseño por resistencia de los perfiles angulares, barras y elementos tubulares de acero estructural que se utilizan en las torres de celosía, los monopostes y los mástiles atirantados. Los siguientes requisitos se basan en la norma AISI-LRFD-99. Cuando los requisitos de AISI-LRFD-99 difieran de los de la presente norma, la presente norma tendrá prelación. Si se utilizan otros perfiles o tipos de estructuras se deberán utilizar los requisitos de AISI-LRFD-99.

Los elementos estructurales de acero liviano laminado en frío no cubiertos por esta norma deberán satisfacer los requisitos de la norma AISI-2001 "Especificación norteamericana para el diseño de elementos estructurales de acero laminado en frío", en adelante denominada Especificación AISI.

4.2 Definiciones

Factor de longitud efectiva: Factor, K, que modifica la longitud no arriostrada, L, para tomar en cuenta la configuración estructural y las condiciones de los extremos.

Relación de esbeltez efectiva: Relación de esbeltez modificada para tomar en cuenta la configuración estructural y las condiciones de los extremos a fin de calcular la resistencia a la compresión de diseño.

Línea de acción: Línea paralela al eje longitudinal de un elemento que atraviesa el baricentro del grupo de bulones que conecta un elemento con otro.

Pandeo en el plano: Dirección de pandeo considerada en el plano definido por la cara de una estructura de celosía.

Pandeo fuera del plano: Dirección de pandeo considerada normal a la cara de una estructura de celosía.

Puntos de panel: Ubicación de los ejes de las uniones de un elemento de arriostramiento a un puntal.

Radio de giro: Raíz cuadrada del momento de inercia respecto del eje de pandeo considerado dividida por el área de un elemento.

Relación de esbeltez: relación entre la longitud no arriostrada, L, y el correspondiente radio de giro, r.

Unión antideslizante: Unión abulonada gobernada por el corte que utiliza orificios holgados u ovalados paralelos a la línea de fuerza.

Elementos secundarios: Elementos utilizados fundamentalmente para reducir la longitud no arriostrada de un elemento.

Longitud no arriostrada: Longitud entre puntos de panel o nodos que proveen restricción, la cual puede variar según los diferentes planos de pandeo dependiendo del patrón de arriostramiento. Para los puntales, L no deberá ser menor que la distancia entre los ejes de los puntos de panel. Para los elementos de arriostramiento, L no deberá ser menor que la longitud entre los centros de los patrones de bulones de conexión o soldaduras.

Pandeo respecto del eje débil: Dirección de pandeo considerada respecto del eje principal débil de un elemento.

4.3 Simbología y notación

α_i = relación de separación;

λ_c = parámetro de esbeltez de las columnas;

η = coeficiente de fricción;

ϕ = factor de resistencia para las uniones;

ϕ_a = factor de resistencia para compresión o tracción axial;

ϕ_c = factor de resistencia para compresión;

ϕ_f = factor de resistencia para flexión;

ϕ_n = factor de resistencia para fluencia bajo tensión normal;

ϕ_p = factor de resistencia para elementos de unión;

ϕ_t = factor de resistencia para tracción;

ϕ_T = factor de resistencia para torsión;

ϕ_v = factor de resistencia para corte;

A = A_n para elementos abulonados y A_g para elementos soldados;

A_b = área nominal del cuerpo no roscado de un bulón;

A_{en} = área neta efectiva;

A_g = área bruta del elemento;

A_{gt} = área bruta sujeta a tracción;

A_{gv} = área bruta sujeta a corte;

- A_n = área neta de un elemento;
 A_{nt} = área neta sujeta a tracción;
 A_{nv} = área neta sujeta a corte;
 A_{pb} = área de aplastamiento proyectada de una placa de unión;
 A_{sf} = área de corte efectiva de una placa de unión;
 a = menor distancia entre el borde del orificio del pasador y el borde del elemento, medida en forma paralela a la dirección de la fuerza;
 a_i = distancia entre conectores;
 $\frac{a_i}{r_{ib}}$ = relación de esbeltez de los componentes individuales;
 $\frac{a_i}{r_i}$ = mayor relación de esbeltez de los componentes individuales;
 B_1 = factor de amplificación de momentos;
 b = ancho de ala de un perfil angular;
 b_{eff} = distancia al borde efectiva de una placa de unión;
 c = distancia entre el eje neutro y la fibra extrema;
 D = diámetro exterior de un elemento tubular;
 d = diámetro nominal de un bulón o pasador;
 E = módulo de elasticidad del elemento;
 F_{cr} = tensión crítica;
 F_s = fuerza de compresión axial de diseño en el elemento soportado;
 F_u = mínima resistencia a la tracción especificada de la pieza crítica conectada;
 F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada de un bulón;
 F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada;
 F'_y = tensión de fluencia efectiva;
 F'_{yf} = tensión de fluencia efectiva para carga de flexión;

- F''_y = tensión de fluencia efectiva basada en el pandeo lateral torsional;
 g = separación transversal entre líneas de sujetadores;
 h = distancia entre el baricentro de los componentes individuales de un elemento armado;
 I_w = momento de inercia respecto del eje principal mayor;
 J = momento de inercia polar;
 K = factor de longitud efectiva;
 KL/r = relación de esbeltez efectiva;
 $\left(\frac{KL}{r}\right)_o$ = relación de esbeltez efectiva de un elemento armado actuando como una unidad;
 $\left(\frac{KL}{r}\right)_m$ = relación de esbeltez efectiva modificada de un elemento armado;
 L = longitud de un elemento sin arriostamiento lateral;
 L_B = longitud lateral no arriestrada;
 L_T = longitud torsional no arriestrada;
 L/r = relación de esbeltez del elemento;
 L_c = distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde de un orificio y el borde de un orificio adyacente o el borde del material;
 M_n = resistencia nominal a la flexión;
 M_{nx} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje x;
 M_{ny} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje y;
 M_{nw} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal mayor;
 M_{nz} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal menor;
 M_u = momento de flexión debido a las cargas mayoradas;
 M_{uw} = momento de flexión respecto del eje principal mayor debido a las cargas mayoradas;

- M_{uz} = momento de flexión respecto del eje principal menor debido a las cargas mayoradas;
- N_t = relación entre las longitudes no arriistradas para flexión y torsión;
- n = número de filetes de rosca por pulgada;
- p = paso de la rosca;
- P_e = carga de pandeo elástico de Euler;
- P_l = resistencia nominal de una placa de unión;
- P_n = resistencia axial nominal;
- P_r = resistencia requerida en un punto de panel dentro de una cara de una estructura de celosía;
- P_s = mínima resistencia del arriostamiento normal al elemento soportado;
- P_u = fuerza de compresión axial debida a las cargas mayoradas;
- r = radio de giro determinante respecto del eje de pandeo;
- r_i = mínimo radio de giro de un componente individual de un elemento armado;
- r_{ib} = radio de giro de un componente individual respecto de su eje baricéntrico paralelo al eje de pandeo considerado para el elemento armado;
- r_x = radio de giro determinante respecto del eje de pandeo x;
- r_y = radio de giro determinante respecto del eje de pandeo y;
- r_z = radio de giro determinante respecto del eje de pandeo z;
- R_n = resistencia nominal al aplastamiento en los orificios para bulones o accesorios;
- R_{np} = resistencia nominal de un elemento de unión;
- R_{nt} = resistencia nominal a la tracción de un bulón o varilla de anclaje;
- R_{nv} = resistencia nominal al corte de un bulón o varilla de anclaje;
- S = mínimo módulo resistente elástico de una sección;
- S_w = módulo resistente elástico hasta el extremo del puntal respecto del eje principal mayor;

- S_z = módulo resistente elástico hasta el extremo del puntal respecto del eje principal menor;
- s = separación longitudinal entre los centros de dos orificios consecutivos;
- T_n = resistencia nominal a la torsión;
- T_u = momentos de torsión debidos a las cargas mayoradas;
- T_{ub} = fuerza de tracción en un bulón debida a las cargas mayoradas;
- t = espesor del elemento o de la pieza crítica conectada;
- U = factor de reducción para el cálculo del área neta efectiva;
- V_n = resistencia nominal al corte;
- V_{ub} = fuerza de corte en un bulón debida a las cargas mayoradas;
- V_u = fuerza de corte transversal en un bulón debida a las cargas mayoradas;
- W_n = ancho neto de la pieza;
- w = ancho de un componente plano de un elemento;
- x = excentricidad de una unión;
- Z = módulo resistente plástico.

4.4 Disposiciones generales

4.4.1 Mínima resistencia del arriostamiento

Para considerar una reducción de la longitud no arriistrada de un elemento soportado en un nodo o punto de panel, el arriostamiento y los elementos secundarios deberán proveer una resistencia mínima, P_s , normal al elemento soportado (en ambas direcciones) en el plano de pandeo considerado. P_s se deberá determinar de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_s = \left[1.5 + \frac{\left(\frac{KL}{r} - 60 \right)}{60} \right] \frac{F_s}{100}$$

$$1.5 \frac{F_s}{100} \leq P_s \leq 2.5 \frac{F_s}{100}$$

donde:

F_s = fuerza de compresión axial de diseño en el elemento soportado

KL/r = relación de esbeltez efectiva del elemento soportado en el plano de pandeo considerado

La resistencia requerida para los puntales en un punto de panel dentro de una cara de una torre, P_r , se deberá determinar de acuerdo con la Tabla 4-1.

Las resistencias de diseño mínimas requeridas de múltiples elementos que se conectan en un punto de panel dentro de una cara se deberán determinar de acuerdo con la Tabla 4-2.

A menos que se realice un análisis más riguroso, un elemento secundario diagonal que esté conectado a cualquiera de los extremos de un elemento secundario horizontal deberá tener una resistencia de diseño mínima igual a un medio de la resistencia de diseño requerida del elemento horizontal dividida por el coseno del ángulo entre ambos elementos (ver Tabla 4-2).

Nota: No es necesario considerar la resistencia mínima, P_s , conjuntamente con ninguna de las combinaciones de cargas.

4.4.2 Relaciones de esbeltez

Preferentemente la relación de esbeltez, L/r , no deberá ser mayor que:

- (a) 150 para los elementos de los puntales,
- (b) 200 para los elementos comprimidos principales excepto los elementos de los puntales,
- (c) 250 para los elementos secundarios, y
- (d) 300 para los elementos traccionados, excepto para el arriostamiento y los cables de las varillas de tracción.

4.4.3 Valores de diseño para la resistencia a la fluencia y a la tracción

Para los propósitos del diseño se deberán usar los valores nominales mínimos de la resistencia a la fluencia y la resistencia última a la tracción correspondientes al tipo y grado de acero especificados.

4.4.4 Excentricidades normales en las uniones

4.4.4.1 Puntales

Las excentricidades se deberán considerar, a menos que se satisfagan las siguientes condiciones:

- (a) Para los puntales de sección circular maciza y tubulares, las líneas de acción de los elementos de arriostamiento se encuentran en un punto dentro del diámetro del puntal.
- (b) Para los puntales en forma de perfiles angulares, las líneas de acción de los elementos de arriostamiento se encuentran en un punto ubicado dentro de una distancia igual a 75% del ancho del perfil angular, b , a ambos lados del baricentro del perfil.
- (c) Para los puntales armados, las líneas de acción de los elementos de arriostamiento se encuentran en un punto ubicado dentro de la sección transversal del puntal armado.

4.4.4.2 Elementos de arriostamiento

Las fórmulas para determinar la relación de esbeltez efectiva especificadas en 4.5.2 toman en cuenta los efectos de la excentricidad de la carga axial para los perfiles angulares conectados por un ala con excentricidades normales en las uniones. Una unión con excentricidad normal se define como aquella en la cual el baricentro del grupo de bulones o soldaduras está ubicado entre el talón del perfil angular y el eje del ala conectada del elemento. Cuando la excentricidad de una unión exceda esta condición, la resistencia del elemento de arriostamiento se deberá multiplicar por el factor $b/2g$, siendo "b" el ancho del ala conectada y "g" la distancia entre el talón del perfil angular y el baricentro de la unión. Si el ancho del ala conectada es menor o igual que 3 in. [76 mm] o si la relación de esbeltez, L/r , es mayor que 120 no es necesario aplicar el factor de reducción.

En el caso de los elementos tubulares y de otras geometrías que estén unidos a perfiles angulares mediante uniones excéntricas similares, para calcular la relación de esbeltez efectiva se deberán usar las mismas fórmulas indicadas en 4.5.2.

4.5 Elementos solicitados a compresión

4.5.1 Puntales

Las relaciones de esbeltez efectiva, KL/r , para los puntales deberán ser como se especifica en la Tabla 4-3. Para las estructuras de celosía el mínimo factor de longitud efectiva, K , deberá ser igual a 1.0.

4.5.2 Elementos de arriostamiento

Las relaciones de esbeltez efectiva, KL/r , para los elementos de arriostamiento se deberán determinar tomando en cuenta la condición de carga, el patrón de arriostamiento, las restricciones de los extremos de los elementos y las excentricidades de las uniones. Las relaciones de esbeltez efectiva, (KL/r) , se deberán determinar de acuerdo con la Tabla 4-4, excepto para los elementos circulares soldados directamente a los puntales, en cuyo caso los factores de longitud efectiva, K , se deberán tomar de la Tabla 4-5. Las Tablas 4-6 y 4-7 indican las longitudes efectivas y las relaciones de esbeltez para los patrones de arriostamiento utilizados

más frecuentemente. La longitud efectiva, L, deberá ser la distancia entre los baricentros de las uniones de los extremos.

No se podrá considerar que un único bulón proporciona restricción parcial contra la rotación. Está permitido considerar que una unión mediante múltiples bulones o soldada proporciona restricción parcial si la unión es a un elemento capaz de resistir la rotación de la unión.

No se podrá considerar que una unión mediante múltiples bulones o soldada exclusivamente a una placa de empalme que no esté también conectada directamente a un elemento que proporcione restricción (por ejemplo un puntal) proporciona restricción parcial en la dirección fuera del plano.

4.5.2.1 Arriostramiento transversal

Cuando esté conectado se considerará que el punto de cruce proporciona apoyo para resistir el pandeo fuera del plano bajo cualquiera de las siguientes condiciones:

- (a) Uno de los elementos diagonales es continuo y la fuerza en el elemento traccionado es al menos igual a 20% de la fuerza en el elemento comprimido.
- (b) En el punto de intersección se provee arriostramiento horizontal triangulado (Figura 4-2) con resistencia suficiente de acuerdo con lo definido en 4.4.1.
- (c) En el punto de cruce hay conectado un elemento horizontal continuo que satisface los siguientes criterios:
 - i. El elemento horizontal continuo tiene resistencia suficiente para proveerle resistencia al puntal de acuerdo con lo definido en 4.4.1.
 - ii. La resistencia del elemento horizontal continuo se determina ignorando la resistencia al pandeo fuera del plano de las diagonales.

Caso contrario, no se deberá considerar que el punto de cruce provee un apoyo para resistir el pandeo fuera del plano. (Ver Tabla 4-6)

Cuando no haya elementos diagonales continuos que atraviesen el punto de cruce se deberá satisfacer una de las siguientes condiciones:

- (d) En el punto de cruce se provee arriostramiento horizontal triangulado con resistencia suficiente de acuerdo con lo definido en 4.4.1.
- (e) Hay un elemento horizontal continuo con resistencia suficiente de acuerdo con lo definido en el punto (c) anterior que atraviesa el punto de cruce.

4.5.2.2 Arriostramientos con disposición en "K" o contravientos

Cuando el elemento horizontal no sea un elemento continuo, se deberá proveer arriostramiento horizontal triangulado en el punto correspondiente al vértice del arriostramiento con resistencia suficiente de acuerdo con lo definido en 4.4.1.

Cuando en un elemento horizontal continuo no se provea arriostramiento horizontal triangulado, la longitud no arriostrada fuera del plano del elemento horizontal se deberá considerar igual a 0.75 veces la longitud total del elemento horizontal. El elemento horizontal deberá tener resistencia suficiente para proveer resistencia a los puntales de acuerdo con lo definido en 4.4.1 usando la longitud total del elemento horizontal. (Ver Tabla 4-7).

4.5.2.3 Arriostramientos con disposición en "K" o contravientos plegados

En el codo principal de la diagonal se deberá proveer arriostramiento vertical interno triangulado con resistencia suficiente de acuerdo con lo definido en 4.4.1. (Ver Figura 4-1)

4.5.3 Elementos armados

Los componentes individuales de los elementos armados compuestos por dos o más perfiles se deberán conectar entre sí a intervalos, a_i , de manera tal que la máxima relación de esbeltez (a_i/r_i) entre conectores de cada uno de los perfiles no sea mayor que 100% de la relación de esbeltez efectiva determinante del elemento armado.

Cuando el ancho conectado (es decir, el ancho del ala conectada de un perfil doble) de un elemento comprimido sea mayor que 4 in. [102 mm], en cada punto de conexión intermedio se deberán usar como mínimo dos bulones.

Para los modos de pandeo que involucran deformaciones relativas que producen esfuerzos de corte en los conectores (por ejemplo, pandeo respecto del eje paralelo a las alas colocadas espalda contra espalda en los perfiles dobles), la relación de esbeltez efectiva se deberá modificar aplicando las siguientes ecuaciones:

- (a) Cuando los extremos están soldados o en ellos se disponen bulones ajustados con la totalidad de la tensión (70% de la resistencia última de los bulones), o cuando se disponen dos o más conectores con bulones ajustados hasta lograr un ajuste sin huelgo:
 - i. Para conectores intermedios abulonados ajustados hasta lograr un ajuste sin huelgo:

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m + \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + \left(\frac{a_i}{r_i}\right)^2}$$

- ii. Para conectores intermedios que están soldados o que tienen bulones ajustados con la totalidad de la tensión de acuerdo con AISI-LRFD-99:

$$\left(\frac{KL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{KL}{r}\right)_o^2 + 0.82 \frac{\alpha_i^2}{(1 + \alpha_i^2)} \left(\frac{a_i}{r_{ib}}\right)^2}$$

donde:

$\left(\frac{KL}{r}\right)_o$ = relación de esbeltez efectiva de un elemento armado actuando como una unidad

$\left(\frac{KL}{r}\right)_m$ = relación de esbeltez efectiva modificada de un elemento armado

$\frac{a_i}{r_i}$ = mayor relación de esbeltez de los componentes individuales

$\frac{a_i}{r_{ib}}$ = relación de esbeltez de los componentes individuales respecto de su eje baricéntrico paralelo al eje de pandeo considerado para el elemento armado

a_i = distancia entre conectores

r_i = mínimo radio de giro de un componente individual

r_{ib} = radio de giro de un componente individual respecto de su eje baricéntrico paralelo al eje de pandeo considerado para el elemento armado

α_i = relación de separación = $h/2r_{ib}$

h = distancia entre el baricentro de los componentes individuales perpendicular al eje de pandeo considerado para el elemento armado

- (b) Cuando en los extremos se utiliza un único conector ajustado hasta lograr un ajuste sin huelgo:

$$\left(\frac{KL}{r}\right) = L / r_{ib}$$

Cuando se utilicen enrejados para conectar elementos comprimidos armados formados por dos o más componentes, los enrejados deberán ser triangulados y deberán abarcar la totalidad de la longitud del elemento. Los elementos comprimidos armados sin enrejados triangulados se deberán modelar como vigas Vierendeel, considerando la combinación de flexión y fuerzas axiales de acuerdo con 4.8. La resistencia de diseño del sistema de arriostamiento deberá ser capaz de proveer la resistencia, P_s , de acuerdo con lo requerido en 4.4.1.

4.5.4 Resistencia a la compresión de diseño

4.5.4.1 Tensión de fluencia efectiva

Para los perfiles angulares de 60° y 90°, la tensión de fluencia efectiva para compresión axial, F'_y , se deberá determinar de la siguiente manera:

$$w/t \leq 0.47 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad F'_y = F_y$$

$$0.47 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < w/t \leq 0.85 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad F'_y = \left[1.677 - 0.677 \left(\frac{w/t}{0.47 \sqrt{E/F_y}} \right) \right] F_y$$

$$0.85 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < w/t \leq 25 \quad F'_y = \left[0.0332 \pi^2 E / (w/t)^2 \right]$$

La relación entre el ancho y el espesor (w/t) de los perfiles angulares no deberá ser mayor que 25 (ver Figura 4-3).

Para los elementos macizos de sección circular, la tensión de fluencia, F'_y , deberá ser igual a F_y .

Para los elementos tubulares de sección circular, la relación entre el diámetro y el espesor (D/t) no deberá ser mayor que 400. La tensión de fluencia efectiva, F'_y , se deberá determinar de la siguiente manera:

$$D/t \leq 0.114 E/F_y \quad F'_y = F_y$$

$$0.114 E/F_y < D/t \leq 0.448 E/F_y \quad F'_y = \left(\frac{0.0379E}{(D/t)F_y} + \frac{2}{3} \right) F_y$$

$$0.448 E/F_y < D/t \leq 400 \quad F'_y = \frac{0.037E}{(D/t)}$$

donde:

D = diámetro exterior de un elemento tubular

t = espesor de pared del elemento tubular

E = módulo de elasticidad del elemento tubular

Para los elementos de acero tubulares de sección poligonal, la máxima relación entre el ancho y el espesor (w/t) y la tensión de fluencia efectiva, F'_y , se deberán determinar de acuerdo con la Tabla 4-8.

Para las demás geometrías, la tensión de fluencia efectiva, F'_y , se deberá determinar de acuerdo con el Capítulo B de la norma AISC-LRFD-99.

4.5.4.2 Resistencia axial de diseño

La resistencia axial de diseño de los elementos comprimidos se deberá tomar como $\phi_c P_n$:

$$\phi_c = 0.90$$

$$P_n = A_g F_{cr}$$

(a) Para $\lambda_c \leq 1.5$

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F'_y$$

(b) Para $\lambda_c > 1.5$

$$F_{cr} = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] F'_y$$

donde:

$$\lambda_c = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F'_y}{E}}$$

= área bruta del elemento, in.² [mm²]

F'_y = tensión de fluencia efectiva, ksi [MPa]

E = módulo de elasticidad, ksi [MPa]

K = factor de longitud efectiva

L = longitud de un elemento sin arriostramiento lateral, in. [mm]

r = radio de giro determinante respecto del eje de pandeo, in. [mm]

No es necesario aplicar la sección E3 de la norma AISC-LRFD-99 para pandeo flexional torsional a los elementos formados por perfiles angulares simples o dobles de sección transversal a 90 o 60 grados.

4.6 Elementos solicitados a tracción

4.6.1 Elementos armados

Preferentemente, la separación longitudinal de los conectores entre componentes de un elemento armado formado por dos o más perfiles deberá limitar la relación de esbeltez entre conectores de cualquier componente a un máximo de 300.

4.6.2 Elementos de arriostramiento solicitados exclusivamente a tracción

Las pestañas soldadas de los extremos de los elementos de arriostramiento solicitados exclusivamente a tracción se deberán detallar de manera que desarrollen la resistencia de diseño del elemento en base a la fluencia de la sección bruta del elemento. El elemento se deberá detallar con una disposición tal que el elemento esté traccionado al ser instalado.

4.6.3 Resistencia a la tracción de diseño

La resistencia a la tracción axial de diseño, $\phi_t P_n$, de un elemento se deberá tomar como el menor valor entre la fluencia en la sección bruta, la rotura en la sección neta efectiva, o la rotura en bloque por corte.

Para la fluencia por tracción en la sección bruta:

$$\phi_t = 0.80 \text{ para los fustes de los anclajes de las riendas}$$

$$\phi_t = 0.90 \text{ para todos los demás elementos}$$

$$P_n = F_y A_g$$

Para rotura por tracción en la sección neta efectiva:

$$\phi_t = 0.65 \text{ para los fustes de los anclajes de las riendas}$$

$$\phi_t = 0.75$$

$$P_n = F_u A_{en}$$

Para rotura en bloque por corte:

$$\phi_t = 0.65 \text{ para los fustes de los anclajes de las riendas}$$

$$\phi_t = 0.75 \text{ para los demás elementos}$$

$$\text{cuando: } F_u A_{nt} \geq 0.6 F_u A_{nv}$$

$$P_n = 0.6 F_y A_{gy} + F_u A_{nt} \leq 0.6 F_u A_{nv} + F_u A_{nt}$$

cuando: $0.6 F_u A_{nv} > F_u A_{nt}$

$$P_n = 0.6 F_u A_{nv} + F_y A_{gt} \leq 0.6 F_u A_{nv} + F_u A_{nt}$$

donde:

A_g = área bruta

A_{en} = área neta efectiva

A_{gv} = área bruta sujeta a corte

A_{gt} = área bruta sujeta a tracción

A_{nv} = área neta sujeta a corte

A_{nt} = área neta sujeta a tracción

4.6.3.1 Área neta

El área neta de un elemento, A_n , se deberá tomar como la suma de los productos entre el espesor y el ancho neto de cada elemento y se deberá calcular de la siguiente manera:

Al calcular el área neta de la sección, el ancho de los orificios para bulones se deberá tomar 1/16 in. [2 mm] mayor que la dimensión nominal del orificio.

Para una cadena de orificios que se extienda a través de una pieza en cualquier línea diagonal o en zigzag, el ancho neto de la pieza, W_n , se deberá obtener restando del ancho bruto la suma de los diámetros o dimensiones de las ranuras de todos los orificios de la cadena, y sumando, para cada separación en la cadena, el valor $s^2/4g$ de acuerdo con lo siguiente:

$$A_n = W_n t + (s^2 t) / (4g)$$

donde:

s = separación longitudinal entre los centros de dos orificios consecutivos

g = separación transversal entre líneas de sujetadores

4.6.3.2 Área neta efectiva

Cuando haya una fuerza de tracción transmitida directamente a cada uno de los elementos de la sección transversal de un componente por medio de sujetadores o soldaduras, el área neta efectiva, A_{en} , será igual al área neta A_n .

Cuando haya una fuerza de tracción transmitida por sujetadores o soldaduras a través de algunos pero no todos los elementos de la sección transversal del componente, el área neta efectiva, incluyendo los efectos del retraso del corte, se deberá tomar como:

$$A_{en} = A U$$

donde:

A = A_n para elementos abulonados y A_g para elementos soldados

U = factor de reducción = $1 - x/L_c$, siendo $0.75 \leq U \leq 0.9$

x = excentricidad de la unión (distancia entre la cara externa del elemento conectado y el baricentro del elemento)

L_c = longitud de la unión en la dirección de la carga (distancia entre los centros de los orificios más externos o longitud de la soldadura en la dirección de la carga)

Notas:

- 1) Para los elementos con un único bulón U deberá ser igual a 0.75.
- 2) Alternativamente, cuando al calcular A_n se ignore la parte saliente de un elemento, no será necesario que U sea menor que 1.0.

4.7 Elementos solicitados a flexión

La resistencia a la flexión de diseño se deberá tomar como $\phi_t M_n$:

$$\phi_t = 0.9$$

M_n = resistencia nominal a la flexión

Nota: No es necesario considerar a los elementos de arriostramiento conectados con excentricidades normales en las uniones de acuerdo con 4.4.4.2 como elementos solicitados a flexión.

4.7.1 Elementos macizos de sección circular

Para los elementos macizos de sección circular, M_n se deberá determinar de la siguiente manera:

$$M_n = F_y' Z$$

donde:

F_y' = tensión de fluencia efectiva determinada de acuerdo con 4.5.4.1

Z = módulo resistente plástico

4.7.2 Elementos tubulares de sección circular

Para los elementos tubulares de sección circular, la relación entre el diámetro y el espesor (D/t) no deberá ser mayor que 400. M_n se deberá determinar de la siguiente manera:

$$\frac{D}{t} \leq 0.0714 \frac{E}{F_y} \quad M_n = F_y Z$$

$$0.0714 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 0.309 \frac{E}{F_y} \quad M_n = \left(\frac{0.0207E}{(D/t)F_y} + 1 \right) F_y S$$

$$0.309 \frac{E}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 400 \quad M_n = \left(\frac{0.330E}{(D/t)} \right) S$$

donde:

D = diámetro exterior del elemento tubular

t = espesor de pared del elemento tubular

E = módulo de elasticidad, 29 000 ksi [200 000 MPa]

S = módulo resistente elástico

Z = módulo resistente plástico

4.7.3 Elementos tubulares de sección poligonal

Para los elementos tubulares de sección poligonal, M_n se deberá determinar de la siguiente manera:

$$M_n = F_y' S$$

donde:

F_y' = tensión de fluencia efectiva determinada de acuerdo con 4.5.4.1

S = mínimo módulo resistente elástico de la sección

4.7.4 Elementos consistentes en un único perfil angular de alas iguales

Para los elementos que consisten en un único perfil angular de 60° o 90° se deberá considerar la flexión respecto de los ejes principales mayor y menor del elemento.

4.7.4.1 Tensión de fluencia efectiva

La tensión de fluencia efectiva para cargas de flexión, F_y' , basada en el pandeo local se deberá determinar de acuerdo con lo siguiente:

$$\frac{b}{t} \leq 0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad F_y' = 1.5 F_y$$

$$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{b}{t} \leq 9.1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad F_y' = \left[1.5 - 0.93 \left(\frac{\frac{b}{t}}{0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}} - 1.0 \right) \right] F_y$$

$$\frac{b}{t} > 9.1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad F_y' = \frac{0.72 E}{\left(\frac{b}{t} \right)^2}$$

donde:

b = ancho de ala del perfil angular

t = espesor del perfil angular

E = módulo de elasticidad, 29 000 ksi [200 000 MPa]

F_y = tensión de fluencia del acero, ksi [MPa]

La tensión de fluencia efectiva, F_y' , basada en el pandeo lateral torsional se deberá determinar de acuerdo con lo siguiente:

$$L_B < L_T \quad F_y' = \left[1.92 - 1.17 \sqrt{\frac{N_t}{N_t'}} \right] F_y$$

$$L_B \geq L_T \quad F_y' = \left[\frac{0.92}{N_t} - \frac{0.17}{N_t'} \right] F_y$$

$$\text{donde: } N_t = \frac{L_B}{L_T}$$

L_B = longitud lateral no arriostrada

$$L_T = \frac{Eb^3t^2}{3F_y' I_w}$$

I_w = momento de inercia respecto del eje principal mayor

Resistencia nominal a la flexión

M_{nw} = $F_y S_w$ o bien $F_x S_w$, cualquiera sea el valor que resulte menor

M_{nz} = $F_y S_z$ cuando las puntas de las alas están sujetas a compresión debido al momento aplicado respecto del eje principal débil

M_{nz} = $1.5 F_y S_z$ cuando las puntas de las alas están sujetas a tracción debido al momento aplicado respecto del eje principal débil

donde:

M_{nw} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal mayor

M_{nz} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal menor

S_z = módulo resistente elástico hasta la punta del ala respecto del eje principal menor

S_w = módulo resistente elástico hasta la punta del ala respecto del eje principal mayor

Se deberán combinar la flexión respecto de los ejes menor y mayor de acuerdo con 4.8.1.2.

4.7.5 Otros elementos

Para las demás geometrías, la resistencia a la flexión de diseño se deberá determinar de acuerdo con el Capítulo F de la norma AISI-LRFD-99.

4.8 Combinación de flexión y fuerzas axiales

4.8.1 Estructuras de celosía

Los momentos mayorados, M_u , se deberán multiplicar por un factor de amplificación, B_1 , de acuerdo con lo siguiente para tomar en cuenta los momentos secundarios en los elementos individuales:

B_1 = 1.0 cuando se consideran los efectos del desplazamiento (efectos P-delta) del elemento o para elementos traccionados

B_1 = $0.85 / (1 - P_u / P_e)$ para elementos cuyos extremos están restringidos o para los elementos continuos (por ejemplo, puntales)

B_1 = $1.00 / (1 - P_u / P_e)$ para elementos cuyos extremos no están restringidos (por ejemplo, elementos de arriostramiento)

donde:

P_u = fuerza de compresión axial debida a las cargas mayoradas

$$P_e = \pi^2 EI / (KL)^2$$

KL = longitud efectiva sin arriostramiento lateral de un elemento en la dirección de pandeo considerada

EI = rigidez flexional en la dirección de pandeo considerada

4.8.1.1 Elementos circulares de sección maciza y tubulares

Los elementos circulares de sección maciza y tubulares que estén sujetos a la combinación de flexión y fuerza axial deberán satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

(a) cuando $\frac{P_u}{\phi_a P_n} \geq 0.2$

$$\left| \frac{8}{9} \left(\frac{P_u}{\phi_a P_n} + \frac{B_1 M_u}{\phi_f M_n} \right) \right| \leq 1.0$$

pero $\frac{P_u}{\phi_a P_n}$ no deberá ser mayor que 1.0

(b) cuando $\frac{P_u}{\phi_a P_n} < 0.2$

$$\left| \frac{P_u}{2\phi_a P_n} + \frac{B_1 M_u}{\phi_f M_n} \right| \leq 1.0$$

Al investigar excentricidades mayores que las excentricidades normales de las uniones de acuerdo con lo definido en 4.4.4, se deberá satisfacer la siguiente ecuación de interacción:

$$\left| \frac{P_u}{\phi_n F_y A} + \frac{M_u}{\phi_f M_n} \right| \leq 1.0$$

donde:

P_u = fuerza axial debida a las cargas mayoradas

P_n = resistencia axial nominal

M_u = momento de flexión resultante debido a las cargas mayoradas

M_n = resistencia nominal a la flexión

$\phi_a = 0.90$ = factor de resistencia para compresión axial

= 0.90 = factor de resistencia para tracción axial

$\phi_n = 0.90$ = factor de resistencia para fluencia bajo tensión normal

$\phi_f = 0.90$ = factor de resistencia para flexión

4.8.1.2 Elementos consistentes en un único perfil angular de alas iguales

Los elementos consistentes en un único perfil angular sujetos a una combinación de flexión y fuerza axial deberán satisfacer las siguientes ecuaciones de interacción:

(a) cuando $\frac{P_u}{\phi_a P_n} \geq 0.2$

$$\frac{8}{9} \left(\frac{P_u}{\phi_a P_n} + \frac{|B M_{uw}|}{\phi_f M_{nw}} + \frac{|B M_{uz}|}{\phi_f M_{nz}} \right) \leq 1.0$$

pero $\frac{P_u}{\phi_a P_n}$ no deberá ser mayor que 1.0

(b) cuando $\frac{P_u}{\phi_a P_n} < 0.2$

$$\frac{|P_u|}{2\phi_a P_n} + \frac{|B M_{uw}|}{\phi_f M_{nw}} + \frac{|B M_{uz}|}{\phi_f M_{nz}} \leq 1.0$$

Al investigar excentricidades mayores que las excentricidades normales de las uniones de acuerdo con lo definido en 4.4.4, se deberá satisfacer la siguiente ecuación de interacción:

$$\frac{|P_u|}{\phi_n F_y A} + \frac{|M_{uw}|}{\phi_f M_{nw}} + \frac{|M_{uz}|}{\phi_f M_{nz}} \leq 1.0$$

donde:

P_u = fuerza axial debida a las cargas mayoradas

P_n = resistencia axial nominal

M_{uw} = momento de flexión respecto del eje principal mayor debido a las cargas mayoradas

M_{uz} = momento de flexión respecto del eje principal menor debido a las cargas mayoradas

M_{nw} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal mayor

M_{nz} = resistencia nominal a la flexión respecto del eje principal menor

$\phi_a = 0.90$ = factor de resistencia para compresión axial

= 0.90 = factor de resistencia para tracción axial

$\phi_f = 0.90$ = factor de resistencia para flexión

$\phi_n = 0.90$ = factor de resistencia para fluencia bajo tensión normal

4.8.1.3 Otros elementos

Para las demás geometrías, la combinación de flexión y fuerza axial se deberá investigar de acuerdo con el Capítulo H de AISC-LRFD-99.

4.8.2 Estructuras tubulares tipo monoposte

Para los postes tubulares se deberá satisfacer la siguiente ecuación de interacción:

$$\left(\frac{P_u}{\phi_c P_n} \right) + \left(\frac{M_u}{\phi_f M_n} \right) + \left[\frac{V_u}{\phi_v V_n} + \frac{T_u}{\phi_t T_n} \right]^2 \leq 1.0$$

Si $\frac{T_u}{\phi_t T_n}$ es mayor que 0.2, M_n no deberá ser mayor que $F'_y S$

donde:

P_u = fuerza de compresión axial debida a las cargas mayoradas

P_n = resistencia nominal a la compresión axial = $(F'_y) (A)$

F'_y = tensión de fluencia efectiva determinada de acuerdo con 4.5.4.1 para los postes circulares o de acuerdo con la Tabla 4-8 para los postes poligonales

M_u = momento de flexión debido a las cargas mayoradas

M_n = resistencia nominal a la flexión de acuerdo con 4.7

V_u = fuerza de corte transversal debida a las cargas mayoradas

V_n = resistencia nominal al corte = $0.5(F'_y)(A)$

S = mínimo módulo resistente elástico de la sección

T_u = momentos de torsión debidos a las cargas mayoradas

T_n = resistencia nominal a la torsión = $(F'_y)(J/c)$

J = momento de inercia polar

c = distancia entre el eje neutro y la fibra extrema

ϕ_c = 0.90 = factor de resistencia para compresión axial

ϕ_f = 0.90 = factor de resistencia para flexión

ϕ_v = 0.90 = factor de resistencia para corte

ϕ_T = 0.90 = factor de resistencia para torsión

4.9 Uniones

4.9.1 Bulones

Los bulones ASTM A490 y ASTM A325 no se deberán reutilizar una vez que hayan sido puestos en servicio y tensionados más allá del 40% de su capacidad última.

No se deberán utilizar bulones A490 galvanizados por inmersión en caliente (o mecánicamente) ni varillas de anclaje A354 Gr. BD galvanizadas por inmersión en caliente (o mecánicamente).

Nota: Para el cálculo de la resistencia a la tracción y al corte de diseño, F_{ub} deberá ser igual a la mínima resistencia a la tracción en base al diámetro de los bulones.

4.9.2 Dispositivos fiadores de tuercas

Para evitar que se aflojen, los bulones usados para conectar elementos portantes deberán estar provistos de un dispositivo o mecanismo fiador de tuercas como por ejemplo tuercas de seguridad, arandelas de seguridad o contratueras, con excepción de lo dispuesto en 4.9.3. El uso de las arandelas de seguridad se deberá limitar a estructuras de altura menor o igual que 1200 ft [366 m].

4.9.3 Bulones pretensados

Para las uniones antideslizantes y para las uniones sujetas a tracción en las cuales la aplicación de cargas externas provoca acción de palanca debido a la deformación de las piezas conectadas se deberán utilizar bulones de alta resistencia ajustados al 70%

de la resistencia última a la tracción del bulón. Para los bulones pretensados no se requieren dispositivos fiadores de tuercas.

Excepción: En el caso de las uniones traccionadas, cuando se pueda demostrar que la rigidez de las piezas conectadas es suficiente para reducir las fuerzas de palanca a valores insignificantes, las uniones traccionadas se podrán realizar con bulones de alta resistencia ajustados hasta la condición de ajuste sin huelgo. La condición de ajuste sin huelgo se define como el apriete que se produce como resultado de unos pocos golpes de una llave de impacto o la aplicación del máximo esfuerzo de una persona usando una llave inglesa.

(Nota: Las superficies de contacto de las uniones antideslizantes no se deberán engrasar ni pintar y, en caso que se utilicen materiales galvanizados, las superficies de contacto se deberán preparar de acuerdo con la norma AISC-LRFD-99).

4.9.4 Distancias a los bordes

Se deberá aplicar la Tabla J3.4 de la Especificación AISC excepto en los bordes cortados, en los cuales la mínima distancia al borde deberá ser igual a 1.5 veces el diámetro del bulón.

Preferentemente la mínima separación de los bulones en una línea será igual a 3 veces el diámetro de los bulones, pero esta separación nunca deberá menor que 2 2/3 diámetros.

4.9.5 Uniones por aplastamiento

En las uniones por aplastamiento está permitido utilizar bulones (incluyendo bulones de alta resistencia) ajustados hasta una condición de ajuste sin huelgo de acuerdo con lo definido en 4.9.3. No se deberán usar uniones por aplastamiento con orificios holgados ni ovalados paralelos a la línea de fuerza para bulones que estén cargados fundamentalmente en corte.

4.9.6 Resistencia de las uniones

4.9.6.1 Resistencia a la tracción de diseño

La resistencia a la tracción de diseño de un único bulón o pieza roscada se deberá tomar como ϕR_{nt}

donde:

$$R_{nt} = F_{ub} A_n$$

El área neta, A_n , de la porción roscada del bulón está dada por la siguiente expresión:

$$A_n = \frac{\pi}{4} \left(d - \frac{0.9743}{n} \right)^2 \text{ in.}^2 \quad A_n = \frac{\pi}{4} (d - 0.9382p)^2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

donde:

$$\phi = 0.75$$

F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada del bulón

d = diámetro nominal del bulón, in. [mm]

n = número de filetes de rosca por pulgada

p = paso de la rosca, mm

Alternativamente, A_n se puede considerar igual a $0.75 A_b$

donde:

A_b = área nominal del cuerpo no roscado del bulón

4.9.6.2 Resistencia al aplastamiento de diseño

La resistencia al aplastamiento en los orificios para bulones o accesorios, ϕR_n , se deberá tomar como:

$$R_n = 1.2 (L_c + d/4) t F_u \leq 2.4 d t F_u$$

Cuando se utilicen orificios ovalados perpendiculares a la línea de fuerza, ϕR_n se deberá tomar como:

$$R_n = 1.0 L_c t F_u \leq 2.0 d t F_u$$

donde:

$$\phi = 0.80$$

L_c = distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde del orificio y el borde de un orificio adyacente o el borde del material, in. [mm]

F_u = mínima resistencia a la tracción especificada de la pieza crítica conectada

d = diámetro nominal del bulón

t = espesor de la pieza crítica conectada

Para las uniones con múltiples bulones, la resistencia al aplastamiento se deberá tomar igual a la suma de las resistencias al aplastamiento de los bulones individuales.

4.9.6.3 Resistencia al corte de diseño

La resistencia al corte de diseño de un bulón, ϕR_{nv} , se deberá tomar como:

$$\phi = 0.75$$

(a) Cuando no hay filetes de rosca incluidos en el plano de corte:

$$R_{nv} = 0.55 F_{ub} A_b$$

(b) Cuando hay filetes de rosca incluidos en el plano de corte:

$$R_{nv} = 0.45 F_{ub} A_b$$

donde:

F_{ub} = mínima resistencia a la tracción especificada del bulón

A_b = área nominal del cuerpo no roscado del bulón

Los orificios ovalados deben ser perpendiculares a la línea de fuerza.

4.9.6.4 Combinación de corte y tracción

Para los bulones sujetos a una combinación de corte y tracción se deberá satisfacer la siguiente relación:

$$\left(\frac{V_{ub}}{\phi R_{nv}} \right)^2 + \left(\frac{T_{ub}}{\phi R_{nt}} \right)^2 \leq 1$$

donde:

$$\phi = 0.75$$

V_{ub} = fuerza de corte en el bulón debida a las cargas mayoradas

R_{nv} = resistencia nominal al corte del bulón

T_{ub} = fuerza de tracción en el bulón debida a las cargas mayoradas

R_{nt} = resistencia nominal a la tracción de un bulón

4.9.6.5 Elementos de unión

La resistencia de diseño de los elementos de unión soldados y abulonados, $\phi_p R_{np}$, deberá ser el menor valor obtenido de acuerdo con el estado límite de fluencia, rotura y rotura en bloque por corte.

$$\phi_p = 0.90 \text{ para fluencia}$$

$$\phi_p = 0.75 \text{ para rotura}$$

$$\phi_p = 0.75 \text{ para rotura en bloque por corte}$$

- (a) Para fluencia por tracción:

$$R_{np} = F_y A_{gt}$$

- (b) Para rotura por tracción:

$$R_{np} = F_u A_{nt}$$

- (c) Para fluencia por corte:

$$R_{np} = 0.60 F_y A_{gv}$$

- (d) Para rotura por corte:

$$R_{np} = 0.60 F_u A_{nv}$$

- (e) Para rotura en bloque por corte:

Ver 4.6.3.

donde:

A_{gv} = área bruta sujeta a corte

A_{gt} = área bruta sujeta a tracción

A_{nv} = área neta sujeta a corte

A_{nt} = área neta sujeta a tracción

Notas:

- Para la determinación del área neta ver la sección 4.6.3.1.
- El ancho usado para determinar las áreas brutas y netas de las placas de conexión no deberá ser mayor que el ancho en el extremo de la placa definido proyectando la fuerza aplicada a partir del comienzo de la unión 30° hacia cada lado de la placa a lo largo de la línea de fuerza.

- El área neta de una placa de conexión no se deberá considerar mayor que 85% del área bruta.

4.9.7 Empalmes

Los empalmes se deberán diseñar para resistir las máximas fuerzas de tracción, compresión y corte que se produzcan en el empalme.

Para los puntales de las torres atirantadas, a menos que para cada rienda se satisfagan los requisitos adicionales referentes a la carga de rotura de las riendas incluidos en el Anexo E, los empalmes en los puntales deberán desarrollar una resistencia a la tracción de diseño mínima igual al menor valor entre el 33% de la fuerza de compresión de diseño en el empalme o 500 kips [2200 kN].

Si en una unión existe excentricidad se deberán considerar las fuerzas adicionales introducidas en la unión.

4.9.7.1 Estructuras tubulares tipo monoposte

La longitud de diseño de un empalme deslizante no deberá ser menor que 1.5 veces el ancho interno de la base de la sección superior. En las secciones transversales poligonales el ancho interno se deberá medir entre elementos planos.

4.9.8 Placas de unión para riendas

La resistencia de diseño de una placa de unión, ϕP_t , se deberá tomar igual al menor de los siguientes valores:

- (a) Tracción sobre el área efectiva:

$$\phi = 0.75 \quad P_t = 2 t b_{eff} F_u$$

- (b) Corte sobre el área efectiva:

$$\phi = 0.75 \quad P_t = 0.6 A_{st} F_u$$

- (c) Aplastamiento sobre el área proyectada en el pasador:

$$\phi = 0.75 \quad P_t = 1.8 A_{pb} F_y$$

- (d) Fluencia sobre el área bruta:

$$\phi = 0.90 \quad P_t = A_g F_y$$

donde:

- a = menor distancia entre el borde del orificio del pasador y el borde del elemento medida en forma paralela a la dirección de la fuerza

Tabla 4-2: Resistencia mínima requerida en los puntos de panel

Notas:

1. Para los puntales con pendientes de más de 15 grados respecto de la vertical, P_r se deberá dividir por el coseno de la pendiente del puntal.

Tabla 4-3: Relaciones de esbeltez efectiva para los puntales

Patrones de arriostamiento simétricos		
	Geometría del puntal	Relaciones de esbeltez efectiva $K = 1.0$
		$\frac{KL}{r_z}$
		$\frac{KL}{r_z}$
	$\frac{KL}{r_z}$	
Patrones de arriostamiento alternados		
	Geometría del puntal	Relaciones de esbeltez efectiva $K = 1.0$
		$\frac{KL}{r_x}, \frac{KL}{r_y}, \left(\frac{1+2N}{3}\right) \frac{KL}{r_z}$
		$\frac{KL}{r_x}, \frac{KL}{r_y}, \left(\frac{1+2N}{3}\right) \frac{KL}{r_z}$
	$\frac{KL}{r_x}$	

Notas:

1. L deberá ser igual a la separación entre paneles medida a lo largo del eje del puntal.
2. Para determinar la resistencia a la compresión de diseño y la resistencia de arriostamiento requerida para proveer apoyo lateral se deberá usar la máxima relación de esbeltez efectiva.

Tabla 4-8: Tensión de fluencia efectiva para los elementos tubulares de sección poligonal

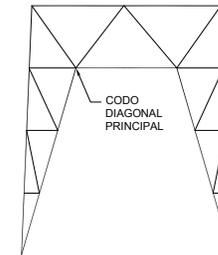
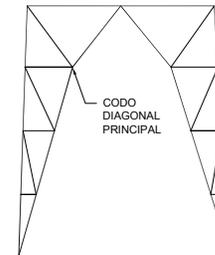
Geometría	Relaciones (w/t)	Tensión de fluencia efectiva
18 lados	$(F_y/E)^{1/2}(w/t) < 1.17$	$F'_y = F_y$
	$1.17 \leq (F_y/E)^{1/2}(w/t) \leq 2.14$	$F'_y = 1.404 F_y [1.0 - 0.245(F_y/E)^{1/2}(w/t)]$
16 lados	$(F_y/E)^{1/2}(w/t) < 1.26$	$F'_y = F_y$
	$1.26 \leq (F_y/E)^{1/2}(w/t) \leq 2.14$	$F'_y = 1.420 F_y [1.0 - 0.233(F_y/E)^{1/2}(w/t)]$
12 lados	$(F_y/E)^{1/2}(w/t) < 1.41$	$F'_y = F_y$
	$1.41 \leq (F_y/E)^{1/2}(w/t) \leq 2.14$	$F'_y = 1.450 F_y [1.0 - 0.220(F_y/E)^{1/2}(w/t)]$
8 lados	$(F_y/E)^{1/2}(w/t) < 1.53$	$F'_y = F_y$
	$1.53 \leq (F_y/E)^{1/2}(w/t) \leq 2.14$	$F'_y = 1.420 F_y [1.0 - 0.194(F_y/E)^{1/2}(w/t)]$

Donde:

- F_y = mínima resistencia a la fluencia especificada del acero, ksi [MPa]
- t = espesor de pared, in. [mm]
- w = dimensión del lado plano calculada usando un radio de plegado interno igual a $4t$
- E = módulo de elasticidad, ksi [MPa]

Notas:

1. Para los elementos poligonales, w/t no deberá ser mayor que 2.14 $(E/F_y)^{1/2}$.
2. Para los propósitos de la investigación de la resistencia, los elementos poligonales de más de 18 lados deberán ser considerados como elementos circulares usando un diámetro igual a la distancia entre elementos planos.

**CONTRAVIENTOS****ARRIOSTRAMIENTO CON
DISPOSICIÓN EN "K" PLEGADO**

NOTA: EN EL CODO DE LA DIAGONAL PRINCIPAL SE REQUIERE
ARRIOSTRAMIENTO VERTICAL TRIANGULADO (VER FIG. 4-2)

Figura 4-1: Arriostramientos con disposición en "K" o contravientos plegados

5.6.5 Cordones para riendas

Los cordones para riendas con recubrimiento de cinc se deberán galvanizar de acuerdo con las normas ASTM A475 o ASTM A586 según corresponda. Se deberá proveer como mínimo un recubrimiento clase A.

5.6.6 Anclajes de las riendas

Las partes galvanizadas del acero de los anclajes y varillas de anclaje se deberán prolongar como mínimo 2 in. [50 mm] hacia el interior del hormigón.

Los anclajes de acero en contacto directo con el suelo deberán tener, como mínimo, un control de la corrosión de acuerdo con 5.6.2. Cuando la resistividad eléctrica medida del suelo sea menor que 50 ohm-m y/o cuando los valores de pH medidos del suelo sean menores que 3 o mayores que 9, para las estructuras Clases II y III se requerirá control adicional de la corrosión. En el Anexo H se describen métodos de control de la corrosión aceptables.

5.6.7 Postes embebidos en el terreno

Los postes de acero en contacto directo con el suelo deberán tener, como mínimo, un control de la corrosión de acuerdo con 5.6.2. Cuando la resistividad eléctrica medida del suelo sea menor que 50 ohm-m y/o cuando los valores de pH medidos del suelo sean menores que 3 o mayores que 9, para las estructuras Clases II y III se requerirá control adicional de la corrosión. En el Anexo H se describen métodos de control de la corrosión aceptables.

Tabla 5-1
Aceros estructurales precalificados

API - 5L	Especificación API 5L.
ASTM A36	Acero estructural.
ASTM A53	Tubos de acero negro y galvanizados por inmersión en caliente, soldados y sin costura.
ASTM A106	Tubos de acero al carbono sin costura.
ASTM A242	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación.
ASTM A500	Tubos estructurales de acero al carbono conformados en frío, electrosoldados y sin costura, de forma circular y no circular.
ASTM A501	Tubos estructurales de acero al carbono conformados en caliente, electrosoldados y sin costura.
ASTM A514	Placa de acero aleado de alta resistencia, templado y revenido, apto para soldadura.
ASTM A529	Acero estructural de alta resistencia de carbono-manganeso.
ASTM A572	Acero estructural de alta resistencia de baja aleación de columbio-vanadio.
ASTM A588	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación, con punto mínimo de fluencia de 50 ksi.
ASTM A606	Láminas y tiras de acero de alta resistencia y baja aleación, laminadas en frío y en caliente, con resistencia a la corrosión mejorada.
ASTM A618	Tubos estructurales de alta resistencia y baja aleación, conformados en caliente, soldados y sin costura.
ASTM A633	Placas de acero estructural normalizado de alta resistencia y baja aleación.
ASTM A871	Placa de acero estructural de alta resistencia y baja aleación con resistencia a la corrosión atmosférica.
ASTM A913	Perfiles de acero estructural de alta resistencia y baja aleación.
ASTM A992	Acero para perfiles estructurales para uso en edificios.

Las siguientes notas corresponden a las notas incluidas en los listados de criterios de diseño por condado:

1. Dentro del condado existen regiones de viento especiales. Consulte los mapas de criterios de diseño en el Apéndice 1. Es posible que la autoridad competente exija velocidades básicas del viento más elevadas para algunos predios específicos dentro de estas regiones para considerar las condiciones de viento locales.
2. Dentro del condado existen regiones de hielo especiales. Consulte los mapas de criterios de diseño en el Apéndice 1. Es posible que la autoridad competente exija velocidades básicas del viento con hielo y/o espesores de hielo de diseño más elevados para algunos predios específicos dentro de estas regiones para considerar las condiciones de viento sobre hielo locales.
3. La profundidad de las heladas de diseño se deberá basar en datos climáticos regionales y el conocimiento de las condiciones locales de acuerdo con 2.6.4.1.

ANEXO C: FUERZA DE VIENTO DE DISEÑO SOBRE ANTENAS TÍPICAS (Normativo)

Este Anexo contiene datos sobre las cargas de viento para las monturas de antenas inalámbricas y antenas de microondas típicas.

Cuando no se especifiquen las orientaciones azimutales de las antenas ubicadas a la misma altura relativa sobre una estructura, se asumirá que las antenas irradian simétricamente alrededor de la estructura.

C.1 Cargas sobre las típicas monturas de antenas inalámbricas

Una típica montura de antenas inalámbricas consiste en múltiples antenas montadas sobre una plataforma u otro soporte similar. Las áreas proyectadas efectivas (EPA) indicadas en este anexo se pueden utilizar como valores presuntos estándares cuando los detalles específicos de las antenas y los soportes no estén definidos (por ejemplo, para la consideración de cargas futuras). No resultaría práctico proveer valores de EPA estándares para cubrir todas las disposiciones de antenas y soportes posibles. Antes de agregar una montura de antenas inalámbricas a una estructura diseñada usando valores de EPA presuntos se deberá realizar una revisión de la estructura considerando las antenas, soportes y accesorios existentes y propuestos de acuerdo con esta Norma.

Tipo de una montura	Sin hielo		Hielo $t_i \leq 0.50''$ [$t_i \leq 13 \text{ mm}$]		Hielo $0.50'' < t_i \leq 1.50''$ [$13 < t_i \leq 38 \text{ mm}$]		Líneas de transmisión
	(EPA) _A ft ² [m ²]	Wt kips [kN]	(EPA) _A ft ² [m ²]	Wt kips [kN]	(EPA) _A ft ² [m ²]	Wt kips [kN]	
Liviana (9 antenas máx.)	55 [6.5]	0.75 [3.3]	75 [7.9]	1.00 [3.3]	1.10 [10.2]	1.50 [6.7]	(9) diámetro 1 5/8 in (2.0 in [51 mm] DE)
Pesada (12 antenas máx.)	80 [8.4]	1.20 [5.3]	100 [9.3]	1.20 [5.3]	135 [12.6]	2.00 [8.9]	(12) diámetro 1 5/8 in (2.0 in [51 mm] DE)

Nota: Para las estructuras de celosía, se deberá considerar que todas las líneas que llegan a la altura de una montura están en una misma cara de la estructura. Estará permitido asumir que las líneas para diferentes monturas están ubicadas en caras adyacentes de la estructura.

C.2 Cargas sobre las típicas antenas de microondas

Los datos de fuerza de viento presentados en este anexo para las típicas antenas de microondas (incluyendo las antenas de rejilla) se describen en el sistema de coordenadas de la antena cuyo origen coincide con el vértice del reflector. La fuerza axial, F_{AM} , actúa a lo largo del eje de la antena. La fuerza lateral, F_{SM} , actúa en forma perpendicular al eje de la antena en el plano formado por el eje de la antena y el vector del viento. El momento torsor, M_M , actúa en el plano que contiene a F_{AM} y F_{SM} . (Ver Figura C-1).

En todos los casos la magnitud de F_{AM} , F_{SM} y M_M dependen de la presión dinámica del viento, del área frontal proyectada de la antena y de las características aerodinámicas del cuerpo de la antena. Las características aerodinámicas varían dependiendo del ángulo del viento. Los valores de F_{AM} , F_{SM} y M_M se deberán determinar usando las siguientes ecuaciones:

$$F_{AM} = q_z G_h C_A A \quad F_{SM} = q_z G_h C_S A \quad M_M = q_z G_h C_M A D$$

donde:

q_z = presión dinámica en el vértice de la antena de acuerdo con 2.6.9.6

G_h = factor de ráfaga de acuerdo con 2.6.7 (dependiendo del tipo de estructura sobre la cual está instalada la antena)

C_A , C_S y C_M son los coeficientes indicados en las Tablas C-1 a C-4 en función del ángulo del viento, θ .

θ = ángulo del viento, ver la convención de signos en la Figura C-1

A = área de apertura exterior de la antena de microondas

D = diámetro exterior de la antena de microondas

Tabla C1: Coeficientes de fuerza del viento para típicas antenas de microondas sin radomo

ÁNGULO DEL VIENTO θ (DEG)	C_A	C_S	C_M
0	1.5508	0.0000	0.0000
10	1.5391	-0.0469	-0.0254
20	1.5469	-0.0508	-0.0379
30	1.5547	-0.0313	-0.0422
40	1.5938	0.0078	-0.0535
50	1.6641	0.0898	-0.0691
60	1.6484	0.2422	-0.0871
70	1.3672	0.4570	-0.0078
80	0.7617	0.3789	0.1000
90	-0.0117	0.3438	0.1313
100	-0.4023	0.3828	0.1320
110	-0.4609	0.4141	0.1340
120	-0.4570	0.4570	0.1430
130	-0.4688	0.4688	0.1461
140	-0.5742	0.4453	0.1320
150	-0.7734	0.3906	0.1086
160	-0.8672	0.2930	0.0836
170	-0.9453	0.1445	0.0508
180	-1.0547	0.0000	0.0000
190	-0.9453	-0.1445	-0.0508
200	-0.8672	-0.2930	-0.0836
210	-0.7734	-0.3906	-0.1086
220	-0.5742	-0.4453	-0.1320
230	-0.4688	-0.4688	-0.1461
240	-0.4570	-0.4570	-0.1430
250	-0.4609	-0.4141	-0.1340
260	-0.4023	-0.3828	-0.1320
270	-0.0117	-0.3438	-0.1313
280	0.7617	-0.3789	-0.1000
290	1.3672	-0.4570	0.0078
300	1.6484	-0.2422	0.0871
310	1.6641	-0.0898	0.0691
320	1.5938	-0.0078	0.0535
330	1.5547	0.0313	0.0422
340	1.5469	0.0508	0.0379
350	1.5391	0.0469	0.0254

Tabla C2: Coeficientes de fuerza del viento para típicas antenas de microondas con radomo

ÁNGULO DEL VIENTO θ (DEG)	C _A	C _S	C _M
0	0.8633	0.0000	0.0000
10	0.8594	0.1484	-0.0797
20	0.8203	0.2969	-0.1113
30	0.7617	0.4102	-0.1082
40	0.6641	0.4883	-0.0801
50	0.5469	0.5313	-0.0445
60	0.4180	0.5000	-0.0008
70	0.3125	0.4609	0.0508
80	0.2266	0.4375	0.1047
90	0.1328	0.4063	0.1523
100	0.0313	0.3906	0.1695
110	-0.0664	0.3711	0.1648
120	-0.1641	0.3477	0.1578
130	-0.2930	0.3203	0.1395
140	-0.4102	0.3047	0.0906
150	-0.5195	0.2734	0.0516
160	-0.6016	0.2266	0.0246
170	-0.6563	0.1484	0.0086
180	-0.6914	0.0000	0.0000
190	-0.6563	-0.1484	-0.0086
200	-0.6016	-0.2266	-0.0246
210	-0.5195	-0.2734	-0.0516
220	-0.4102	-0.3047	-0.0906
230	-0.2930	-0.3203	-0.1395
240	-0.1641	-0.3477	-0.1578
250	-0.0664	-0.3711	-0.1648
260	0.0313	-0.3906	-0.1695
270	0.1328	-0.4063	-0.1523
280	0.2266	-0.4375	-0.1047
290	0.3125	-0.4609	-0.0508
300	0.4180	-0.5000	0.0008
310	0.5469	-0.5313	0.0445
320	0.6641	-0.4883	0.0801
330	0.7617	-0.4102	0.1082
340	0.8203	-0.2969	0.1113
350	0.8594	-0.1484	0.0797

Tabla C3: Coeficientes de fuerza del viento para típicas antenas de microondas con cubierta cilíndrica

ÁNGULO DEL VIENTO θ (DEG)	C _A	C _S	C _M
0	1.2617	0.0000	0.0000
10	1.2617	0.0977	-0.0281
20	1.2500	0.1758	-0.0453
30	1.2109	0.2344	-0.0520
40	1.1563	0.2813	-0.0488
50	1.0859	0.3047	-0.0324
60	0.9453	0.3672	-0.0086
70	0.6719	0.4766	0.0227
80	0.2734	0.5820	0.0695
90	-0.1094	0.6250	0.0980
100	-0.3438	0.6016	0.1125
110	-0.5391	0.5313	0.1141
120	-0.7109	0.4375	0.1039
130	-0.8594	0.3125	0.0926
140	-0.9336	0.2305	0.0777
150	-0.9570	0.1758	0.0617
160	-0.9727	0.1484	0.0438
170	-0.9961	0.0977	0.0230
180	-1.0156	0.0000	0.0000
190	-0.9961	-0.0977	-0.0230
200	-0.9727	-0.1484	-0.0438
210	-0.9570	-0.1758	-0.0617
220	-0.9336	-0.2305	-0.0777
230	-0.8594	-0.3125	-0.0926
240	-0.7109	-0.4375	-0.1039
250	-0.5391	-0.5313	-0.1137
260	-0.3438	-0.6016	-0.1125
270	-0.1094	-0.6250	-0.0980
280	0.2734	-0.5820	-0.0695
290	0.6719	-0.4766	-0.0227
300	0.9453	-0.3672	0.0086
310	1.0859	-0.3047	0.0324
320	1.1563	-0.2813	0.0488
330	1.2109	-0.2344	0.0520
340	1.2500	-0.1758	0.0453
350	1.2617	-0.0977	0.0281

Tabla C4: Coeficientes de fuerza del viento para típicas antenas de microondas de rejilla sin hielo

ÁNGULO DEL VIENTO θ (DEG)	C_A	C_S	C_M
0	0.5352	0	0.0000
10	0.5234	10	0.0168
20	0.5078	20	0.0289
30	0.4609	30	0.0383
40	0.4063	40	0.0449
50	0.3438	50	0.0496
60	0.2344	60	0.0527
70	0.1289	70	0.0555
80	0.0391	80	0.0492
90	-0.0508	90	0.0434
100	-0.1172	100	0.0469
110	-0.1875	110	0.0504
120	-0.2656	120	0.0512
130	-0.3359	130	0.0496
140	-0.4063	140	0.0445
150	-0.4766	150	0.0371
160	-0.5469	160	0.0273
170	-0.5859	170	0.0148
180	-0.5938	180	0.0000
190	-0.5859	190	-0.0148
200	-0.5469	200	-0.0273
210	-0.4766	210	-0.0371
220	-0.4063	220	-0.0445
230	-0.3359	230	-0.0496
240	-0.2656	240	-0.0512
250	-0.1875	250	-0.0504
260	-0.1172	260	-0.0469
270	-0.0508	270	-0.0434
280	0.0391	280	-0.0492
290	0.1289	290	-0.0555
300	0.2344	300	-0.0527
310	0.3438	310	-0.0496
320	0.4063	320	-0.0449
330	0.4609	330	-0.0383
340	0.5078	340	-0.0289
350	0.5234	350	-0.0168

Nota: En ausencia de datos más precisos, para condiciones con hielo se deberán utilizar los coeficientes de la Tabla C1.

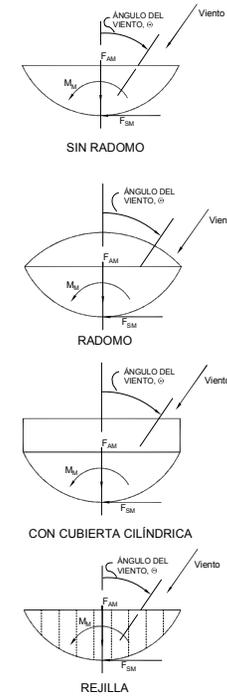


Figura C-1: Fuerzas de viento sobre las típicas antenas de microondas

ANEXO D: LIMITACIONES DE LA ROTACIÓN Y EL DESPLAZAMIENTO DE LAS ANTENAS DE MICROONDAS (Normativo)

Este Anexo contiene límites de deformación por rotación y desplazamiento para las estructuras que soportan antenas de microondas en la condición correspondiente a estado límite de servicio.

Los límites de torsión y desplazamiento de la estructura a la altura de una antena, θ , se deberán calcular de acuerdo con lo siguiente:

- a) Para una antena de microondas con una degradación admisible del nivel de la señal de radiofrecuencia de 10 dB:

$$\theta = \frac{C_{10}}{D \alpha}$$

- b) Para una antena de microondas con una degradación admisible del nivel de la señal de radiofrecuencia de 3 dB:

$$\theta = \frac{C_3}{D \alpha}$$

donde:

- θ = límite de torsión o desplazamiento, grados
 C_{10} = 53.1 GHz.ft.deg [16.2 GHz.m.deg]
 C_3 = 31.0 GHz.ft.deg [9.45 GHz.m.deg]
 D = diámetro del plato, ft [m]
 α = frecuencia del plato, GHz

Notas:

- Los valores de θ calculados no implican una precisión en la determinación del ancho de viga o la rigidez estructural más allá de los valores prácticos y procedimientos de cálculo conocidos. Para la mayor parte de las estructuras que soportan antenas no resulta práctico especificar una rigidez estructural calculada menor que 0.25 grados de torsión o desplazamiento con una velocidad básica del viento de 60 mph [26.8 m/s].
- La sección A2.8 requiere que las deformaciones por defecto en estado límite se basen en una degradación total admisible de 10 dB. La ecuación basada en 3 dB se provee a título de referencia.

ANEXO E: ROTURA DE LAS RIENDAS (Normativo)

E.1 Alcance

Este Anexo define un método estático simplificado equivalente que se podrá utilizar cuando se especifique el requisito de verificar la condición de rotura de las riendas.

E.2 Introducción

Resulta muy complicado realizar un análisis exacto de un mástil atirantado para determinar los efectos dinámicos provocados por la súbita rotura de una rienda, ya que esto depende de las características de la rotura, de la amortiguación de la estructura, de las vibraciones de las riendas y del mástil, etc. El siguiente método estático equivalente simula el comportamiento de la estructura inmediatamente después de la rotura de una rienda.

El método aquí presentado se basa en las siguientes hipótesis simplificadoras:

- La rotura consiste en un simple corte de la rienda.
- Se desprecia la energía elástica almacenada en la rienda antes de su rotura.
- No se considera la amortiguación.
- En el momento de la rotura de la rienda la carga del viento es mínima y se desprecia.
- En el caso de las riendas en las caras o niveles de riendas que involucren estabilizadores de torsión, se deberá considerar que las dos riendas en la misma dirección general están cortadas. (Nota: los efectos torsionales de una única rienda cortada en este tipo de configuraciones están fuera del alcance de este anexo.)

Los mástiles atirantados que tengan riendas en un solo nivel deberán tener bases fijas a fin de proveer resistencia contra la rotura de las riendas.

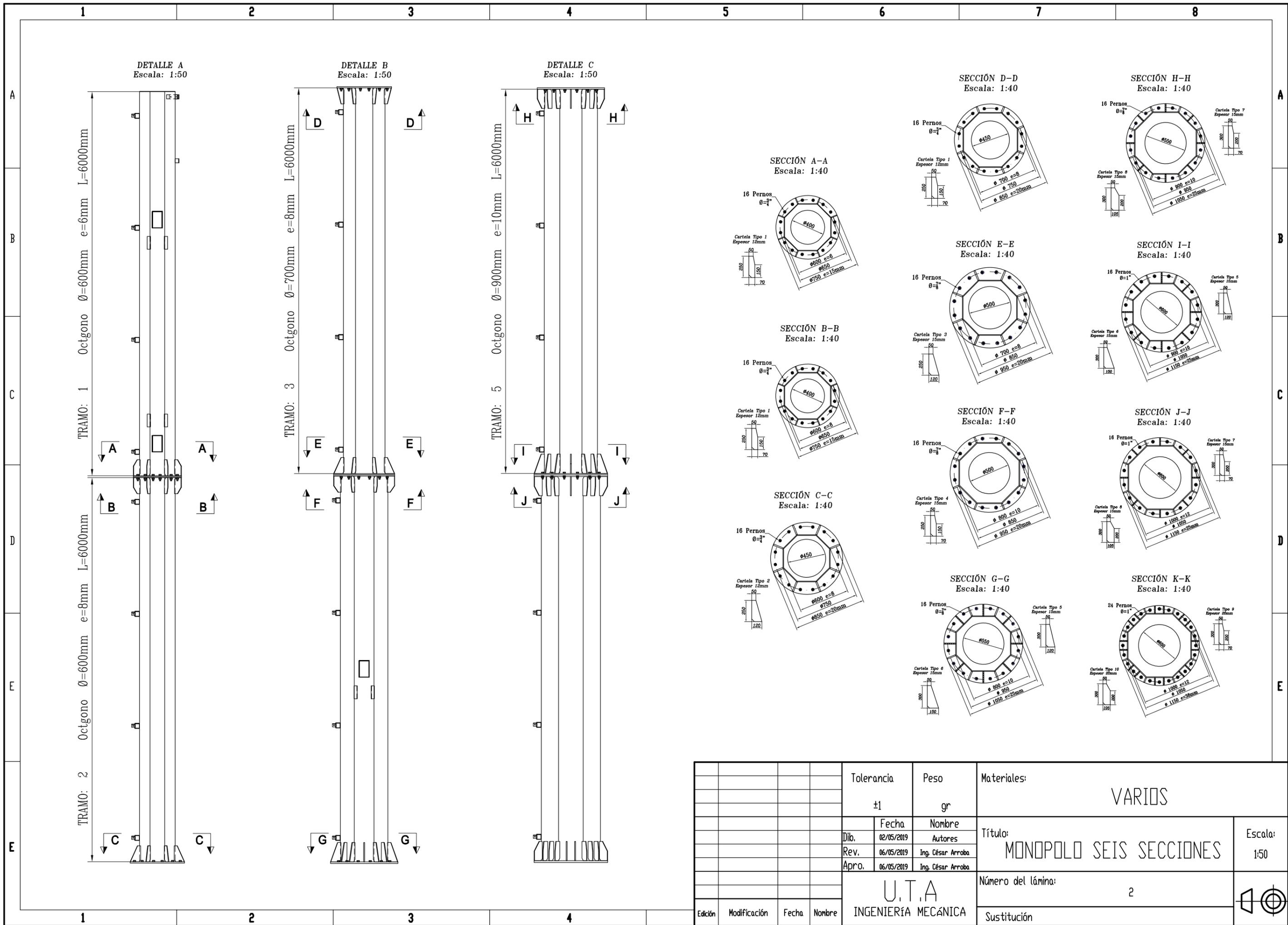
Este método reemplaza las fuerzas dinámicas que actúan sobre el mástil inmediatamente después de la rotura de una rienda por una fuerza horizontal estática equivalente (F_{din}) actuando sobre el mástil al nivel de fijación de la rienda rota (Figura E-1).

E.3 Método de análisis

- Las riendas restantes —excluyendo la rienda cortada (rienda 1)— se analizan como un sistema en el cual el mástil se reemplaza por un soporte vertical bajo la acción de una fuerza horizontal aplicada, F , actuando en la dirección de la rienda rota. Se genera la curva 1 (Figura E-2) para diferentes valores de F graficando la suma de las componentes horizontales en la dirección paralela a F de todas las riendas no cortadas al nivel de la rienda cortada contra las correspondientes deflexiones del sistema de riendas en el nivel de la rienda cortada a partir de la

ANEXO 4

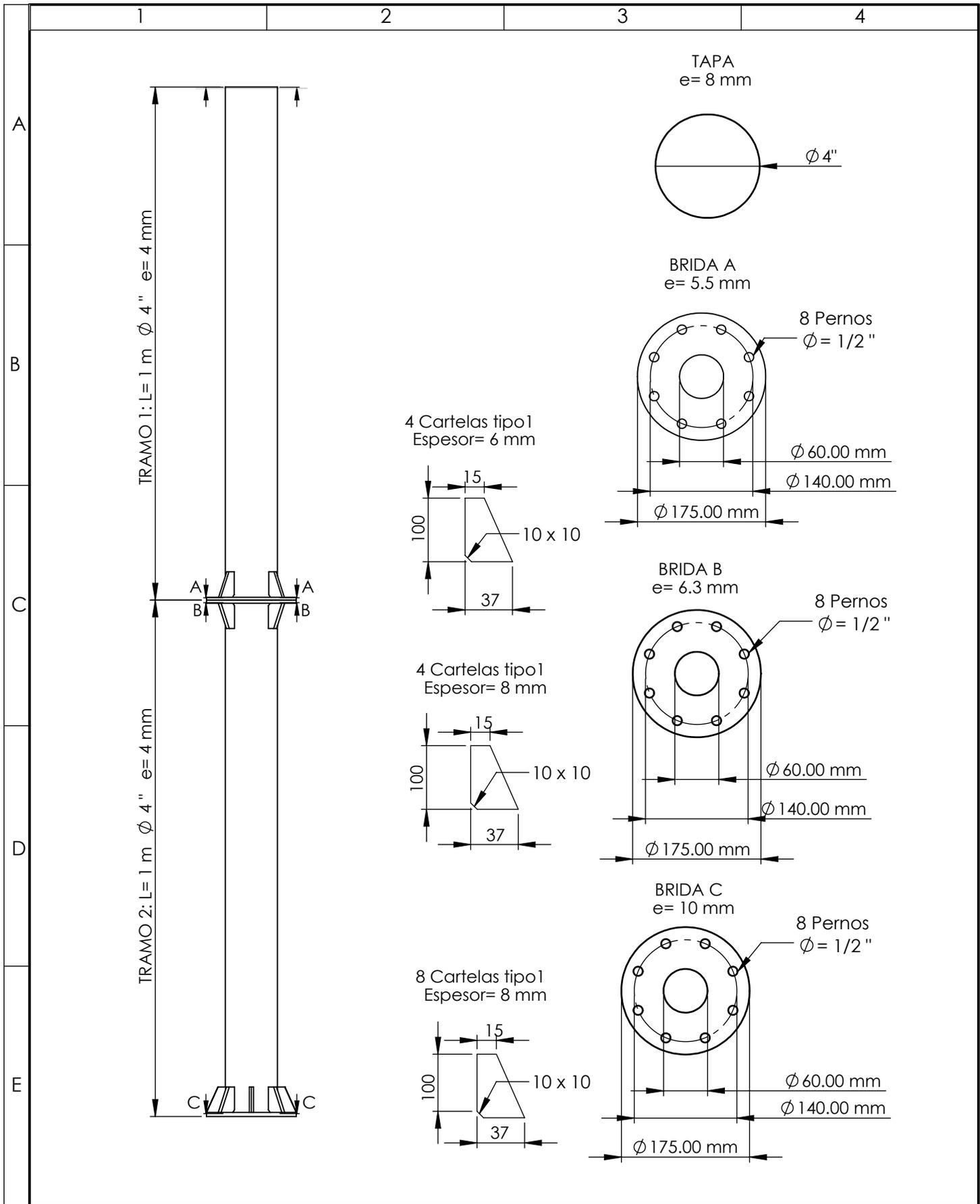
PLANO CONSTITUTIVO DEL MONOPOLO DE SEIS SECCIONES



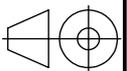
				Tolerancia	Peso	Materiales:	
				± 1	gr	VARIOS	
				Fecha	Nombre	Título:	
				Dib. 02/05/2019	Autores	MONOPOLO SEIS SECCIONES	
				Rev. 06/05/2019	Ing. César Arroba	Escala:	
				Apro. 06/05/2019	Ing. César Arroba	1:50	
				U.T.A INGENIERÍA MECÁNICA		Número del lámina:	
						2	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución	

ANEXO 5

PLANO CONSTITUTIVO DEL PROTOTIPO



				Tolerancia: +/- 0.5	Peso:	MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL	
				Fecha	Nombre	TÍTULO: PROTOTIPO	
				Dibujó: 05/04/2019	AUTORES	Escala: 1:10	
				Revisó: 05/04/2019	Ing. César Arroba		
				Aprobó: 05/04/2019	Ing. César Arroba		
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		N.º de Lámina 1	Registro:
Edición:	Modificación:	Fecha:	Nombre:			(Sustitución:)	



ANEXO 6

Ecuación matricial del metamodelo

$$[F] = [K]/[u]$$

Donde:

Matriz fuerza (Cada nodo posee tres grados de libertad)

$$[F] = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \\ F_9 \\ F_{10} \\ F_{11} \\ F_{12} \end{bmatrix}$$

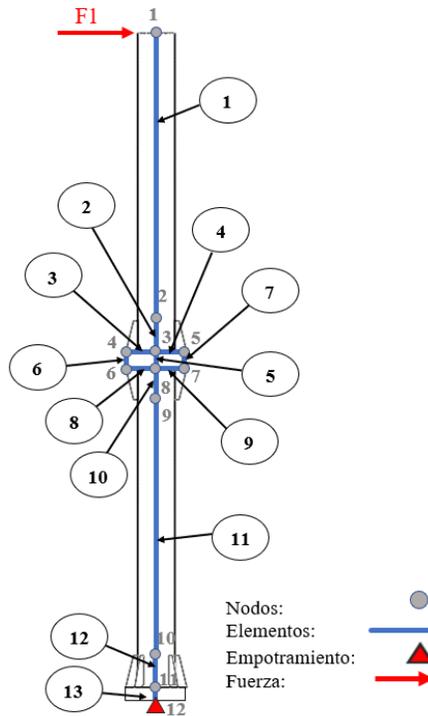
Matriz desplazamiento (Cada nodo posee tres grados de libertad)

$$[u] = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \\ \delta_7 \\ \delta_8 \\ \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

ANEXO 7

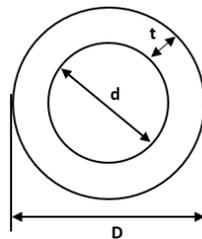
DETERMINACION DE ÁREAS, INERCIAS Y LONGITUDES EQUIVALENTES DEL METAMODELO

Configuración del metamodelo



Determinación de áreas e inercias

Los elementos 1 y 11 representan la sección circular de la estructura, como se muestra en la figura, con valores de diámetro exterior $D = 4$ in y espesor $t = 4$ mm, estos valores no variaran en la formulación del metamodelo, por lo tanto:



$$d = D - 2t$$

$$d = 101.6 \text{ mm} - 2(4 \text{ mm})$$

$$d = 93.6 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (101.6^2 - 93.6^2)}{4}$$

$$A_1 = A_{11} = 1226.48 \text{ mm}^2$$

$$I_{xx} = I_{yy}$$

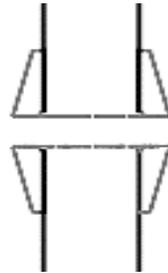
$$I = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64}$$

$$I = \frac{\pi * (101.6^4 - 93.6^4)}{64}$$

$$I = 1462844.56 \text{ mm}^4$$

$$I_1 = I_{11} = 1.46 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Los elementos 2 ,10 y 12 representan la sección circular de la estructura reforzada con cartelas, como se muestra en la figura, por lo cual se procede a determinar una sección equivalente que asemeje las propiedades físicas que estas producen.



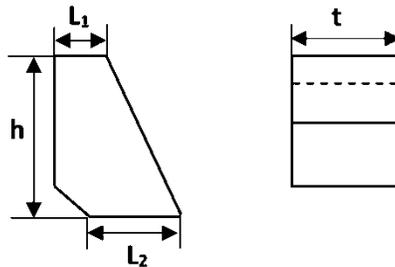
Primero calculamos el área promedio de la sección transversal de una cartela con los siguientes datos:

Datos

$$L_1 = 15 \text{ mm}$$

$$L_2 = 37 \text{ mm}$$

$$t = 6 \text{ mm}$$



$$A_1 = e * L_1$$

$$A_1 = 6 * 15$$

$$A_1 = 90 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = e * L_2$$

$$A_2 = 6 * 37$$

$$A_2 = 222 \text{ mm}^2$$

$$A_p = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

$$A_p = \frac{90 + 222}{2}$$

$$A_p = 156 \text{ mm}^2$$

Determinamos el Área equivalente por el número de cartelas

$$A_{eq} = A_p * N$$

$$A_{eq} = 156 * 4$$

$$A_{eq} = 624$$

Con el objetivo de mantener una geometría semejante al de la sección procedemos a determinar el incremento del diámetro exterior e inercia respecto a la sección circular de los elementos 1 y 11, por lo tanto:

$$A_{in} = A_{sec} + A_{eq}$$

$$A_{in} = 1226.48 + 624$$

$$A_{in} = 1850.48 \text{ mm}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A_{in}}{\pi} + d^2}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 1850.48}{\pi} + (93.6)^2}$$

$$D = 105.44 \text{ mm}$$

$$I = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64}$$

$$I = \frac{\pi * (105.44^4 - 93.6^4)}{64}$$

$$I = 2298989.806 \text{ mm}^4 = 2.30 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\% = \frac{I_{in} - I_{sec}}{I_{in}} * 100$$

$$\% = \frac{2.30 - 1.46}{2.30} * 100$$

$$\% = 36\% \approx 40\%$$

$$\%_{cartela} = \frac{\%}{N}$$

$$\%_{cartela} = \frac{40}{4} = 10\%$$

Al ser la inercia una propiedad de sección de gran relevancia y para obtener una relación de incremento respecto al número de cartelas instaladas se ha determinado que el incremento de inercia es del 10% por cada cartela. Por lo tanto, con dicho parámetro recalculamos la inercia y el área equivalentes.

$$I_{in} = I_{sec} + 10\% * N * I_{sec}$$

$$I_{in} = 1462844.56 + 10\% * 4 * 1462844.56$$

$$I_{in} = 2047982.4$$

$$I_2 = I_{10} = 2.05 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * I_{in}}{\pi} + d^4}$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * 2.05 \times 10^6}{\pi} + (93.6)^4}$$

$$D = 106.31 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4}$$

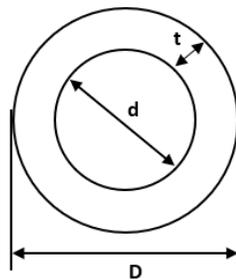
$$A = \frac{\pi * (106.31^2 - 93.6^2)}{4}$$

$$A_2 = A_{10} = 1667.94 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, la geometría equivalente de los elementos 2 y 10 es la siguiente:

$$D = 106.31 \text{ mm}$$

$$d = 93.6 \text{ mm}$$



Por otra parte, el elemento 12 posee 8 cartelas de manera análoga al cálculo de las propiedades de los elementos 2 y 10 determinamos las propiedades de sección equivalentes:

$$I_{in} = I_{sec} + 10\% * N * I_{sec}$$

$$I_{in} = 1462844.56 + 10\% * 8 * 1462844.56$$

$$I_{in} = 2633120.223$$

$$I_{12} = 2.63 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * I_{in}}{\pi} + d^4}$$

$$D = \sqrt[4]{\frac{64 * 2.63 \times 10^6}{\pi} + (93.6)^4}$$

$$D = 106.85 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4}$$

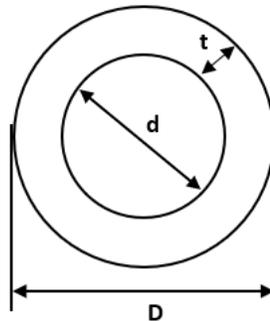
$$A = \frac{\pi * (106.85^2 - 93.6^2)}{4}$$

$$A_{12} = 2087.7 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, la geometría equivalente del elemento 12 es la siguiente:

$$D = 106.85 \text{ mm}$$

$$d = 93.6 \text{ mm}$$



Los elementos 3, 4, 8 y 9 representan las bridas de la junta como se muestra en la figura, por lo cual se procede a determinar una sección equivalente que asemeje las propiedades físicas de estas.

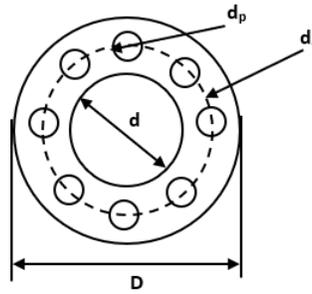
$$D = 175 \text{ mm}$$

$$d = 60$$

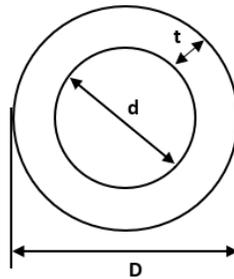
$$d_a = 140$$

$$d_p = 12.7$$

$$N_p = 8$$



Para determinar la inercia de la brida, separamos en geometrías más sencillas y mediante la aplicación del teorema de Steiner determinamos su inercia.



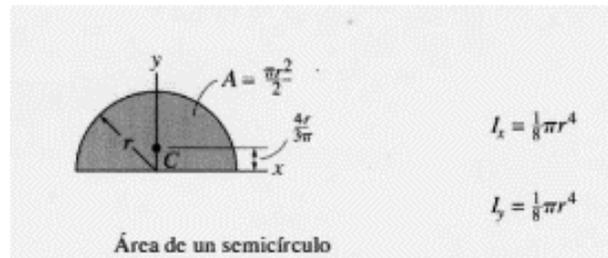
$$I_{xx} = I_{yy}$$

$$I_{sa} = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64}$$

$$I_{sa} = \frac{\pi * (175^4 - 60^4)}{64}$$

$$I_{sa} = 45402425.88 \text{ mm}^4$$

Para determinar la inercia de un agujero, determinamos la inercia de la mitad de la sección de un perno.



$$I_a = \frac{\pi * d_p^4}{128}$$

$$I_a = \frac{\pi * (12.7)^4}{64}$$

$$I_a = 638.49 \text{ mm}^4$$

$$A_a = \frac{\pi * d_p^2}{8}$$

$$A_a = \frac{\pi * (12.7)^2}{8}$$

$$A_a = 63.34 \text{ mm}^2$$

Teorema de Steiner

$$I_c = I_0 + r^2 * A$$

Al ser una figura simétrica podemos realizar una pequeña variación al teorema de Steiner para calcular la inercia de la brida según el número de pernos

$$I_b = I_{sa} - N_p * \left[I_a + \left(\frac{d_a}{2} \right)^2 * A_a \right]$$

$$I_b = 45402425.88 - 8 * \left[638.49 - \left(\frac{140}{2} \right)^2 * 63.34 \right]$$

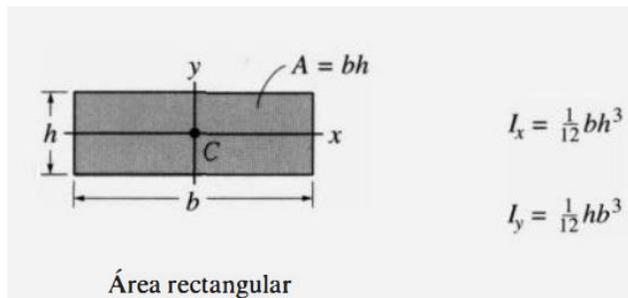
$$I_b = 42914389.96 \text{ mm}^4 = 42.91 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Nota: El metamodelo planteado no toma en cuenta la interacción entre la base y el anclaje de cimentación, además la geometría de la brida base es semejante a la de las bridas de la junta por lo tanto las propiedades del elemento 13 son:

$$I_{13} = 42.91 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_{13} = 23219.011 \text{ mm}^2$$

Para determinar la sección equivalente de los elementos 3 y 4, debemos tomar en cuenta el cambio de plano que se hace para el ensamble del meta modelo por lo tanto determinamos una sección cuadrada equivalente



$$b = h = L$$

$$L_{eq} = \sqrt[4]{12 * I_b}$$

$$L_{eq} = \sqrt[4]{12 * 42.91 \times 10^6}$$

$$L_{eq} = 150.64 \text{ mm}$$

Para los elementos 3 y 4 el espesor de la brida es de $e = 5.5$, por lo tanto:

$$I_y = I_3 = I_4$$

$$I_3 = \frac{L_{eq} * e^3}{12}$$

$$I_3 = \frac{150.64 * 5.5^3}{12}$$

$$I_3 = I_4 = \mathbf{2088.59 \text{ mm}^4}$$

$$A_3 = L_{eq} * e$$

$$A_3 = 150.64 * 5.5$$

$$A_3 = A_4 = \mathbf{828.53 \text{ mm}^2}$$

Para los elementos 8 y 9 el espesor de la brida es de $e = 6.3$, por lo tanto:

$$I_y = I_8 = I_9$$

$$I_8 = \frac{L_{eq} * e^3}{12}$$

$$I_8 = \frac{150.64 * 6.3^3}{12}$$

$$I_8 = I_9 = \mathbf{3138.96 \text{ mm}^4}$$

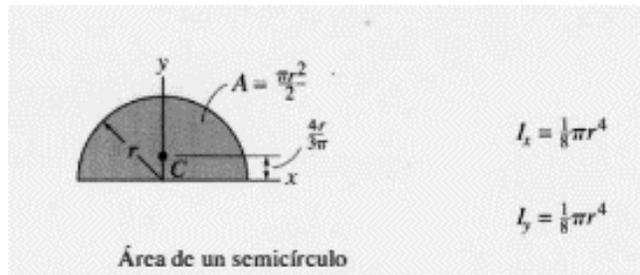
$$A_8 = L_{eq} * e$$

$$A_8 = 150.64 * 6.3$$

$$A_8 = A_9 = \mathbf{949.04 \text{ mm}^2}$$

Los elementos 5 ,6 y 7 representan los pernos de la junta como se muestra en la figura, por lo cual se procede a determinar una sección equivalente que asemeje las propiedades físicas de estos.

Para determinar la inercia del elemento 5, determinamos la inercia de la mitad de la sección de un perno y mediante la aplicación del teorema de Steiner determinamos la sección equivalente del elemento.



$$I_y = I_a$$

$$I_a = \frac{\pi * d_p^4}{128}$$

$$I_a = \frac{\pi * (12.7)^4}{64}$$

$$I_a = 638.49 \text{ mm}^4$$

$$A_a = \frac{\pi * d_p^2}{8}$$

$$A_a = \frac{\pi * (12.7)^2}{8}$$

$$A_a = 63.34 \text{ mm}^2$$

Teorema de Steiner

$$I_c = I_0 + r^2 * A$$

Al ser una figura simétrica podemos realizar una pequeña variación al teorema de Steiner para calcular la inercia del elemento 5 según el número de pernos

$$I_5 = (N_p - 2) * \left[I_a + \left(\frac{d_a}{2} \right)^2 * A_a \right]$$

$$I_5 = 6 * \left[638.49 - \left(\frac{140}{2} \right)^2 * 63.34 \right]$$

$$I_5 = 1866026 \text{ mm}^4 = 1.87 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$d_5 = \sqrt[4]{\frac{64 * I_5}{\pi}}$$

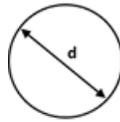
$$d_5 = 78.56$$

$$A_5 = \frac{\pi * D_5^2}{4}$$

$$A_5 = \frac{\pi * (78.56)^2}{4}$$

$$A_5 = \mathbf{4847.58 \text{ mm}^2}$$

Por otra parte, para los elementos 6 y 7, el cálculo de las propiedades geométricas se realiza tomando en cuenta la sección real de los pernos.



$$I_{yy} = I_{xx}$$

$$I_6 = \frac{\pi * d_p^4}{64}$$

$$I_6 = \frac{\pi * (12.7)^4}{64}$$

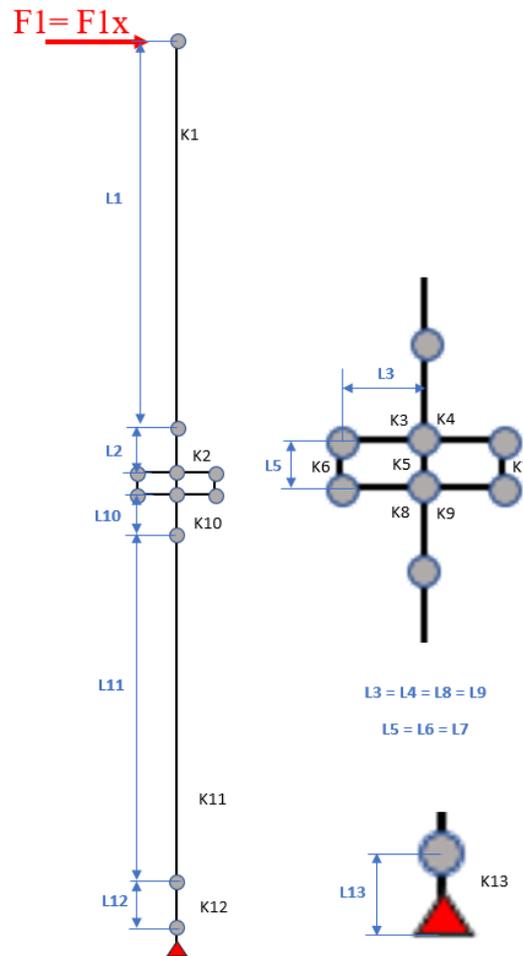
$$I_6 = \mathbf{1276.98 \text{ mm}^4}$$

$$A_6 = \frac{\pi * d_p^2}{4}$$

$$A_6 = \frac{\pi * (12.7)^2}{4}$$

$$A_6 = A_7 = \mathbf{126.68 \text{ mm}^2}$$

Determinación de longitudes equivalentes



Elemento	Nomenclatura	Longitud L_i
1	L1	900 mm
2	L2	100 mm
3	L3	70 mm
4	L4	70 mm
5	L5	46,78 mm
6	L6	46,78 mm
7	L7	46,78 mm
8	L8	70 mm
9	L9	70 mm
10	L10	100 mm
11	L11	800 mm
12	L12	100 mm
13	L13	10 mm

Cabe mencionar, que para los elementos 5, 6 y 7 se determinó la longitud equivalente a partir de ensayos experimentales realizados con ayuda del software de elementos finitos, permitiendo obtener la relación entre la longitud equivalente y el espesor en función del número de pernos. Esto se realizó con la finalidad de expresar la no linealidad existente en el tipo de estructura estudiada en esta investigación.

$$L_i = \begin{cases} 2641.6 e^{-0.518 t} & \text{para } n_p = 4 \\ 2331.9 e^{-0.665 t} & \text{para } n_p = 8 \\ 2077 e^{-1.243 t} & \text{para } n_p = 12 \end{cases}$$

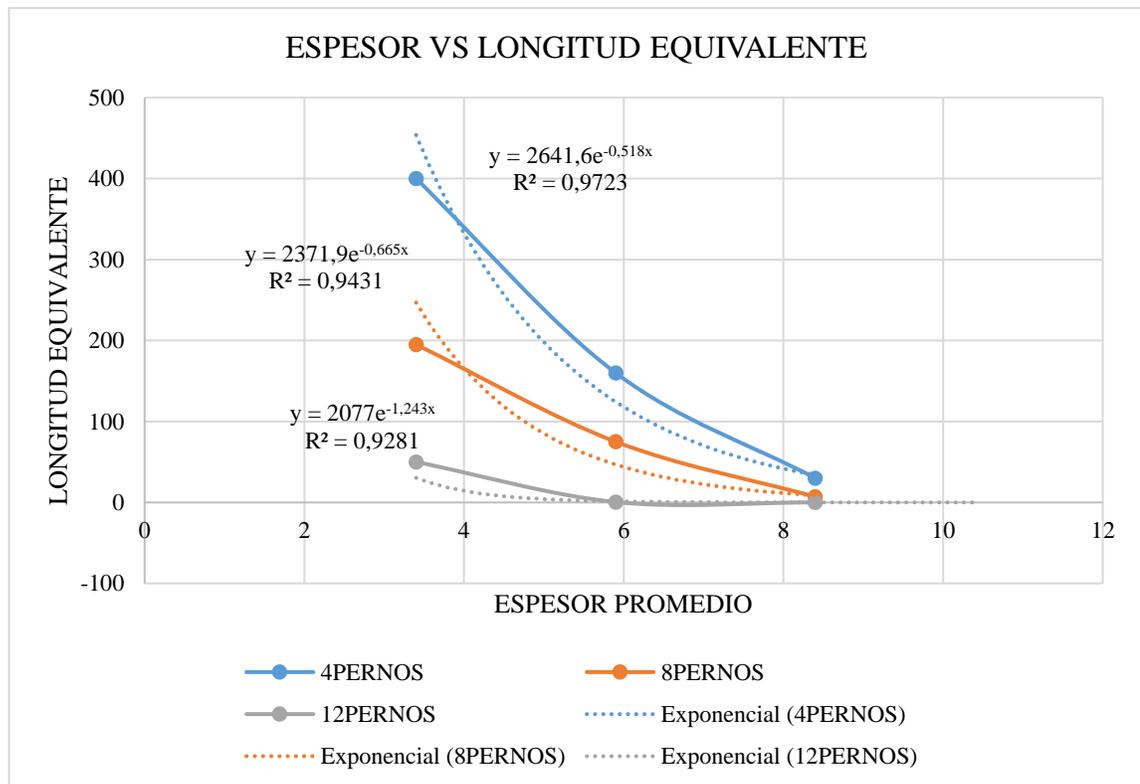
Donde:

L_i = Longitud del elemento [mm]

t = Espesor real de la brida [mm]

n_p = Numero de pernos

A continuación, se presenta un resumen de la experimentación realizada en el software por elementos finitos y las gráficas que permitieron obtener las ecuaciones propuestas.



Número de pernos	4	8	12
Espesor promedio	Longitud equivalente	Longitud equivalente	Longitud equivalente
3.4	400	195	50
5.9	160	75	0.5
8.4	30	7	0.1

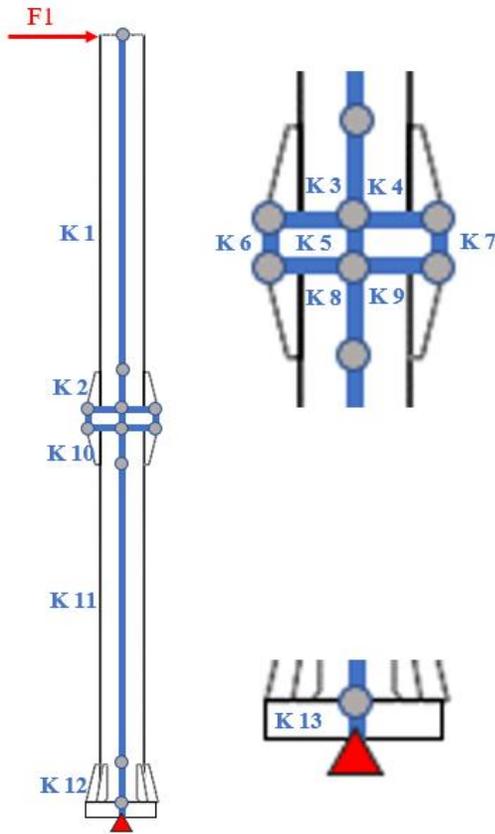
Datos obtenidos de la experimentación de la estructura por elementos finitos con elementos tipo shell

Número de pernos			4	8	12
Espesor brida superior	Espesor brida inferior	Espesor promedio	Desplazamiento máximo		
3	3.8	3.4	41.5754	26.6088	25.2202
3.5	4.3	3.9	36.4559	25.0107	23.8917
4	4.8	4.4	33.1477	24.0082	23.0856
4.5	5.3	4.9	30.8583	23.3313	22.5566
5	5.8	5.4	29.1918	22.8478	22.1879
5.5	6.3	5.9	27.9311	22.4870	21.9186
6	6.8	6.4	26.9480	22.2081	21.7144
6.5	7.3	6.9	26.1622	21.9864	21.5549
7	7.8	7.4	25.5212	21.8062	21.4272
7.5	8.3	7.9	24.9893	21.6570	21.3228
8	8.8	8.4	24.5416	21.5318	21.2361

Datos obtenidos de la experimentación del metamodelo de simulación de la para la obtención de longitud equivalente

Numero de pernos	Longitud equivalente	Sección equivalente brida superior	Sección equivalente brida inferior	Desplazamiento máximo
4	400	4.55784625	5.44197356	38.3623352
	160	7.18109624	7.95104373	27.448431
	30	9.511219846	10.21599647	22.5286407
8	195	4.55784625	5.44197356	27.3050499
	75	7.18109624	7.95104373	23.6149139
	7	9.511219846	10.21599647	21.6749878
12	50	4.55784625	5.44197356	22.8175812
	0.5	7.18109624	7.95104373	21.4965458
	0.1	9.511219846	10.21599647	21.4843655

Resumen de parámetros del metamodelo



Elemento	Nomenclatura	Longitud L_i	Área A_i	Inercia I_i
1	k1	900 mm	1226.48 mm ²	1.46x10 ⁶ mm ⁴
2	k2	100 mm	1667.94 mm ²	2.05x10 ⁶ mm ⁴
3	k3	70 mm	828.53 mm ²	2088.59 mm ⁴
4	k4	70 mm	828.53 mm ²	2088.59 mm ⁴
5	k5	46,78 mm	4847.58 mm ²	1.87x10 ⁶ mm ⁴
6	k6	46,78 mm	126.68 mm ²	1276.98 mm ⁴
7	k7	46,78 mm	126.68 mm ²	1276.98 mm ⁴
8	k8	70 mm	949.04 mm ²	3138.96 mm ⁴
9	k9	70 mm	949.04 mm ²	3138.96 mm ⁴
10	k10	100 mm	1667.94 mm ²	2.05x10 ⁶ mm ⁴
11	k11	800 mm	1226.48 mm ²	1.46x10 ⁶ mm ⁴
12	k12	100 mm	2087.7 mm ²	2.63x10 ⁶ mm ⁴
13	k13	10 mm	23219.011 mm ²	42.91x10 ⁶ mm ⁴

ANEXO 8

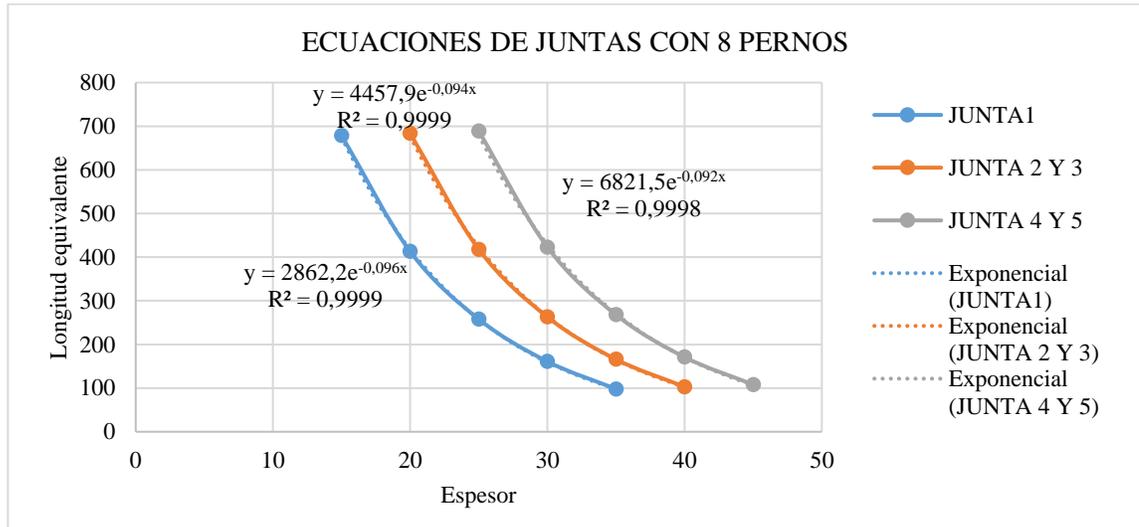
Tabla de parámetros de longitudes y secciones equivalentes para metamodelo de simulación de una estructura de 6 secciones

		ESTRUCTURA							Radio PERNOS		
		LONGITUD EN Y	LONGITUD EN X	LONGITUD DEL ELEMENTO	Diam ext.	Radio Ext	Diam Int	Radio Int	Radio Brida	c/u	N-2
TRAMO 1	SC1	5750			569.64	284.82	558.25	279.12			
	(SC+C)1 INF	257.5			578.29	289.14	558.25	279.12			
	B1 INF	15	641	320.5					55.31	78.68	152.210
TRAMO 2	B2 SUP		641	320.5					55.31		
	(SC+C)2 SUP	257.5			580.97	290.49	554.45	277.23			
	SC2	5500			569.64	284.82	554.45	277.23			
	(SC+C)2 INF	260			580.97	290.49	554.45	277.23			
TRAMO 3	B2 INF	20	727	363.5					68.04	84.52	163.498
	B2 SUP		727	363.5					68.04		
	(SC+C)2 SUP	260			676.02	338.01	649.39	324.70			
	SC2	5450			664.58	332.29	649.39	324.70			
TRAMO 4	(SC+C)2 INF	310			676.02	338.01	649.39	324.70			
	B2 INF	20	813	406.5					71.93	97.19	188.003
	B2 SUP		813	406.5					71.93		
	(SC+C)2 SUP	310			773.75	386.87	740.53	370.27			
TRAMO 5	SC2	5400			759.52	379.76	740.53	370.27			
	(SC+C)2 INF	312.5			787.23	393.61	740.53	370.27			
	B2 INF	25	899	449.5					84.59	102.75	198.753
	B2 SUP		899	449.5					84.59		
TRAMO 6	(SC+C)2 SUP	312.5			882.44	441.22	835.47	417.74			
	SC2	5400			854.46	427.23	835.47	417.74			
	(SC+C)2 INF	312.5			882.44	441.22	835.47	417.74			
	B2 INF	25	985	492.5					88.52	115.48	223.380
TRAMO 6	B2 SUP		985	492.5					88.52		
	(SC+C)2 SUP	312.5			982.77	491.38	926.62	463.31			
	SC2	5400			949.40	474.70	926.62	463.31			
	(SC+C)2 INF	300			998.25	499.12	926.62	463.31			
	B2 INF	38			1145.23	572.62	600.00	300.00			

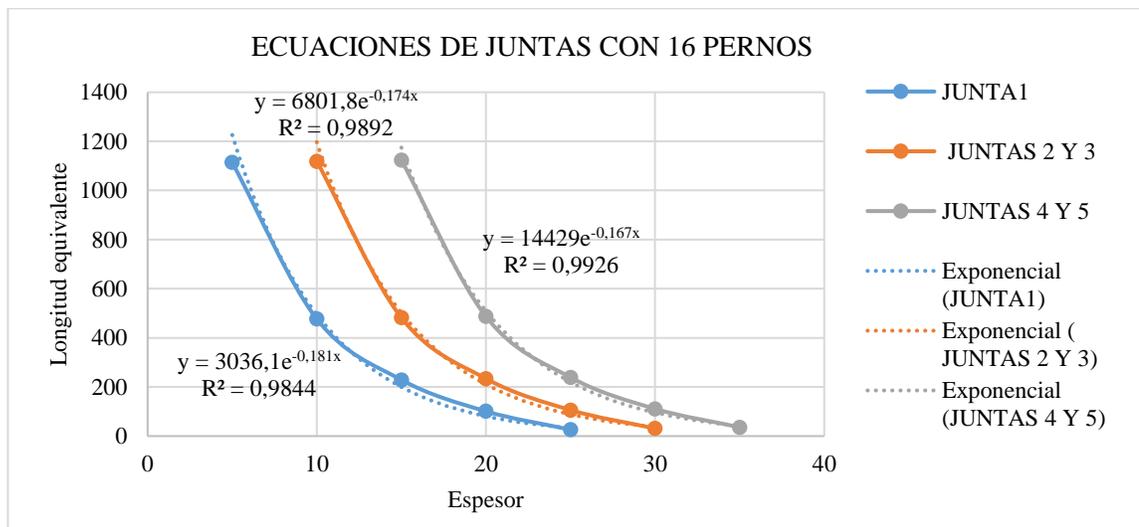
Tabla de parámetros obtenidos para la determinación de las ecuaciones para el metamodelo de simulación de una estructura tipo monopolo de 6 secciones.

Número de junta	Junta1		Junta2		Junta3		Junta4		Junta5	
Número de pernos	espesor	longitud eq								
8	35	98	40	103	40	103	45	108	45	108
	30	161	35	166	35	166	40	171	40	171
	25	258	30	263	30	263	35	268	35	268
	20	413	25	418	25	418	30	423	30	423
	15	679	20	684	20	684	25	689	25	689
16	25	26	30	31	30	31	35	36	35	36
	20	101	25	106	25	106	30	111	30	111
	15	229	20	234	20	234	25	239	25	239
	10	477	15	482	15	482	20	487	20	487
	5	1114	10	1119	10	1119	15	1124	15	1124
24	15	55	20	60	20	60	25	65	25	65
	10	191	15	196	15	196	20	201	20	201
	5	461	10	466	10	466	15	471	15	471

Determinación de las ecuaciones para el metamodelo de simulación de una estructura tipo monopolo de 6 secciones con juntas bridadas de 8 pernos, mediante la aproximación exponencial de los datos obtenidos, como se observa en la figura las ecuaciones son de tipo exponencial obteniendo un valor de R2 mínimo de 0.9998.

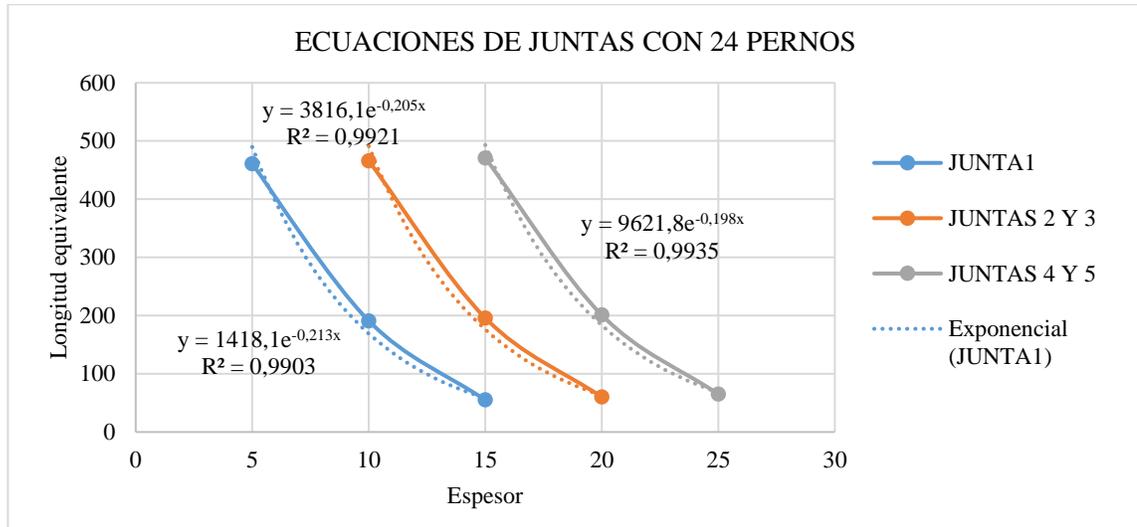


Determinación de las ecuaciones para el metamodelo de simulación de una estructura tipo monopolo de 6 secciones con juntas bridadas de 16 pernos, mediante la aproximación exponencial de los datos obtenidos, como se observa en la figura las ecuaciones son de tipo exponencial obteniendo un valor de R2 mínimo de 0.9844.



Determinación de las ecuaciones para el metamodelo de simulación de una estructura tipo monopolo de 6 secciones con juntas bridadas de 24 pernos, mediante la aproximación

exponencial de los datos obtenidos, como se observa en la figura las ecuaciones son de tipo exponencial obteniendo un valor de R2 mínimo de 0.9903.



Finalmente, las ecuaciones son las siguientes:

$$L_i = \begin{cases} 6821.5 e^{-0.092 t} & \text{para } h = 6 \text{ y } h = 12 \\ 4457.9 e^{-0.094 t} & \text{para } h = 18 \text{ y } h = 24 \\ 2862.2 e^{-0.096 t} & \text{para } h = 30 \end{cases} \quad \text{con } n_p = 8$$

$$L_i = \begin{cases} 14429 e^{-0.092 t} & \text{para } h = 6 \text{ y } h = 12 \\ 6801.8 e^{-0.094 t} & \text{para } h = 18 \text{ y } h = 24 \\ 3036.1 e^{-0.181 t} & \text{para } h = 30 \end{cases} \quad \text{con } n_p = 16$$

$$L_i = \begin{cases} 9621.8 e^{-0.198 t} & \text{para } h = 6 \text{ y } h = 12 \\ 3816.1 e^{-0.205 t} & \text{para } h = 18 \text{ y } h = 24 \\ 1481.1 e^{-0.213 t} & \text{para } h = 30 \end{cases} \quad \text{con } n_p = 24$$

Donde:

L_i = Longitud del elemento [mm]

t = Espesor real de la brida [mm]

h = Ubicación de la junta [m]

n_p = Numero de pernos

Los datos de experimentación mediante software de elementos finitos se encuentran detallados en las tablas siguientes.

Experimentación mediante software de elementos finitos para juntas con 8 pernos

iteración	bridas junta 5	espesor junta 5	cartela supsec6	cartela infsec5	cartela supsec5	espesor junta 4	cartela infsec4	bridas junta 4	bridas junta 4	cartela supsec4	espesor junta 3	cartela infsec3	cartela s upsec3	espesor junta2	bridas junta 2	cartela supsec2	espesor junta 1	bridas junta 1	sección brida junta 1
1	492.5	11	300	300	300	11	300	449.5	406.5	300	6	300	250	6	363.5	250	1	250	320.5
2	492.5	14	300	300	300	14	300	449.5	406.5	300	9	300	250	9	363.5	250	4	250	320.5
3	492.5	19	300	300	300	19	300	449.5	406.5	300	14	300	250	14	363.5	250	9	250	320.5
4	492.5	26	300	300	300	26	300	449.5	406.5	300	21	300	250	21	363.5	250	16	250	320.5
5	492.5	35	300	300	300	35	300	449.5	406.5	300	30	300	250	30	363.5	250	25	250	320.5
6	492.5	46	300	300	300	46	300	449.5	406.5	300	41	300	250	41	363.5	250	36	250	320.5
7	492.5	59	300	300	300	59	300	449.5	406.5	300	54	300	250	54	363.5	250	49	250	320.5
8	492.5	74	300	300	300	74	300	449.5	406.5	300	69	300	250	69	363.5	250	64	250	320.5
9	492.5	91	300	300	300	91	300	449.5	406.5	300	86	300	250	86	363.5	250	81	250	320.5
10	492.5	110	300	300	300	110	300	449.5	406.5	300	105	300	250	105	363.5	250	100	250	320.5
11	492.5	131	300	300	300	131	300	449.5	406.5	300	126	300	250	126	363.5	250	121	250	320.5
12	492.5	154	300	300	300	154	300	449.5	406.5	300	149	300	250	149	363.5	250	144	250	320.5
13	492.5	179	300	300	300	179	300	449.5	406.5	300	174	300	250	174	363.5	250	169	250	320.5
14	492.5	206	300	300	300	206	300	449.5	406.5	300	201	300	250	201	363.5	250	196	250	320.5
15	492.5	235	300	300	300	235	300	449.5	406.5	300	230	300	250	230	363.5	250	225	250	320.5
16	492.5	266	300	300	300	266	300	449.5	406.5	300	261	300	250	261	363.5	250	256	250	320.5
17	492.5	299	300	300	300	299	300	449.5	406.5	300	294	300	250	294	363.5	250	289	250	320.5
18	492.5	334	300	300	300	334	300	449.5	406.5	300	329	300	250	329	363.5	250	324	250	320.5
19	492.5	371	300	300	300	371	300	449.5	406.5	300	366	300	250	366	363.5	250	361	250	320.5
20	492.5	410	300	300	300	410	300	449.5	406.5	300	405	300	250	405	363.5	250	400	250	320.5
21	492.5	494	300	300	300	494	300	449.5	406.5	300	489	300	250	489	363.5	250	484	250	320.5
22	492.5	586	300	300	300	586	300	449.5	406.5	300	581	300	250	581	363.5	250	576	250	320.5
23	492.5	686	300	300	300	686	300	449.5	406.5	300	681	300	250	681	363.5	250	676	250	320.5
24	492.5	794	300	300	300	794	300	449.5	406.5	300	789	300	250	789	363.5	250	784	250	320.5
25	492.5	910	300	300	300	910	300	449.5	406.5	300	905	300	250	905	363.5	250	900	250	320.5
26	492.5	1034	300	300	300	1034	300	449.5	406.5	300	1029	300	250	1029	363.5	250	1024	250	320.5
27	492.5	1166	300	300	300	1166	300	449.5	406.5	300	1161	300	250	1161	363.5	250	1156	250	320.5
28	492.5	1306	300	300	300	1306	300	449.5	406.5	300	1301	300	250	1301	363.5	250	1296	250	320.5
29	492.5	1454	300	300	300	1454	300	449.5	406.5	300	1449	300	250	1449	363.5	250	1444	250	320.5
30	492.5	1610	300	300	300	1610	300	449.5	406.5	300	1605	300	250	1605	363.5	250	1600	250	320.5

iteración	sección brida junta2	sección brida junta3	sección brida junta4	sección brida junta5	cartela infsec1	pernosjunta1	pernojunta2	pernojunta1	pernosjunta2	pernojunta3	pernosjunta3	pernojunta4	pernosjunta4	pernojunta5	pernosjunta6	deformación máxima
1	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	388.243469
2	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	389.119049
3	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	390.577393
4	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	392.618164
5	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	395.240662
6	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	398.444519
7	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	402.22998
8	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	406.597809
9	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	411.550018
10	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	417.089783
11	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	423.221802
12	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	429.952362
13	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	437.289551
14	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	445.243347
15	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	453.825653
16	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	463.050232
17	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	472.932953
18	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	483.491577
19	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	494.74588
20	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	506.717529
21	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	532.909485
22	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	562.279785
23	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	595.071533
24	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	631.558838
25	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	672.047485
26	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	716.875671
27	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	766.41571
28	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	821.075562
29	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	881.30072
30	68.09	72	84.66	88.6	250	123.155	9.525	9.525	132.287	11.1125	152.115	11.1125	160.813	12.7	180.738	947.576355

Experimentación mediante software de elementos finitos para juntas con 16 pernos

iteración	bridas junta 5	espesor junta 5	cartela supsec6	cartela infsec5	cartela supsec5	espesor junta 4	cartela infsec4	bridas junta 4	bridas junta 4	cartela supsec4	espesor junta 3	cartela infsec3	cartela s upsec3	espesor junta2	bridas junta 2	cartela supsec2	espesor junta 1	bridas junta 1	sección brida junta 1
1	493.5	11	300	300	300	11	300	450.5	407	300	6	300	250	6	364	250	1	321	55.36
2	493.5	14	300	300	300	14	300	450.5	407	300	9	300	250	9	364	250	4	321	55.36
3	493.5	19	300	300	300	19	300	450.5	407	300	14	300	250	14	364	250	9	321	55.36
4	493.5	26	300	300	300	26	300	450.5	407	300	21	300	250	21	364	250	16	321	55.36
5	493.5	35	300	300	300	35	300	450.5	407	300	30	300	250	30	364	250	25	321	55.36
6	493.5	46	300	300	300	46	300	450.5	407	300	41	300	250	41	364	250	36	321	55.36
7	493.5	59	300	300	300	59	300	450.5	407	300	54	300	250	54	364	250	49	321	55.36
8	493.5	74	300	300	300	74	300	450.5	407	300	69	300	250	69	364	250	64	321	55.36
9	493.5	91	300	300	300	91	300	450.5	407	300	86	300	250	86	364	250	81	321	55.36
10	493.5	110	300	300	300	110	300	450.5	407	300	105	300	250	105	364	250	100	321	55.36
11	493.5	131	300	300	300	131	300	450.5	407	300	126	300	250	126	364	250	121	321	55.36
12	493.5	154	300	300	300	154	300	450.5	407	300	149	300	250	149	364	250	144	321	55.36
13	493.5	179	300	300	300	179	300	450.5	407	300	174	300	250	174	364	250	169	321	55.36
14	493.5	206	300	300	300	206	300	450.5	407	300	201	300	250	201	364	250	196	321	55.36
15	493.5	235	300	300	300	235	300	450.5	407	300	230	300	250	230	364	250	225	321	55.36
16	493.5	266	300	300	300	266	300	450.5	407	300	261	300	250	261	364	250	256	321	55.36
17	493.5	299	300	300	300	299	300	450.5	407	300	294	300	250	294	364	250	289	321	55.36
18	493.5	334	300	300	300	334	300	450.5	407	300	329	300	250	329	364	250	324	321	55.36
19	493.5	371	300	300	300	371	300	450.5	407	300	366	300	250	366	364	250	361	321	55.36
20	493.5	410	300	300	300	410	300	450.5	407	300	405	300	250	405	364	250	400	321	55.36
21	493.5	494	300	300	300	494	300	450.5	407	300	489	300	250	489	364	250	484	321	55.36
22	493.5	586	300	300	300	586	300	450.5	407	300	581	300	250	581	364	250	576	321	55.36
23	493.5	686	300	300	300	686	300	450.5	407	300	681	300	250	681	364	250	676	321	55.36
24	493.5	794	300	300	300	794	300	450.5	407	300	789	300	250	789	364	250	784	321	55.36
25	493.5	910	300	300	300	910	300	450.5	407	300	905	300	250	905	364	250	900	321	55.36
26	493.5	1034	300	300	300	1034	300	450.5	407	300	1029	300	250	1029	364	250	1024	321	55.36
27	493.5	1166	300	300	300	1166	300	450.5	407	300	1161	300	250	1161	364	250	1156	321	55.36
28	493.5	1306	300	300	300	1306	300	450.5	407	300	1301	300	250	1301	364	250	1296	321	55.36
29	493.5	1454	300	300	300	1454	300	450.5	407	300	1449	300	250	1449	364	250	1444	321	55.36
30	493.5	1610	300	300	300	1610	300	450.5	407	300	1605	300	250	1605	364	250	1600	321	55.36

iteración	sección brida junta2	sección brida junta3	sección brida junta4	sección brida junta5	cartela infsec1	pernosjunta1	pernojunta2	pernojunta1	pernosjunta2	pernojunta3	pernosjunta3	pernojunta4	pernosjunta4	pernojunta5	pernosjunta6	deformación máxima
1	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	389.894562
2	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	390.453064
3	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	391.385315
4	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	392.691772
5	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	394.373901
6	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	396.433838
7	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	398.873749
8	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	401.696899
9	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	404.906952
10	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	408.50824
11	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	412.50589
12	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	416.905701
13	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	421.714355
14	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	426.939331
15	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	432.588928
16	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	438.672333
17	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	445.199615
18	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	452.181732
19	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	459.630554
20	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	467.558868
21	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	484.90979
22	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	504.355591
23	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	526.032776
24	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	550.093872
25	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	576.708008
26	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	606.061523
27	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	638.358765
28	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	673.823303
29	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	712.698547
30	55.31	68.04	71.93	84.59	88.59	152.21	9.525	9.525	163.498	11.1125	188.003	11.1125	198.753	12.7	223.38	755.249146

Experimentación mediante software de elementos finitos para juntas con 24 pernos

iteración	bridas junta 5	espesor junta 5	cartela supsec6	cartela infsec5	cartela supsec5	espesor junta 4	cartela infsec4	bridas junta 4	bridas junta 4	cartela supsec4	espesor junta 3	cartela infsec3	cartela s upsec3	espesor junta2	bridas junta 2	cartela supsec2	espesor junta 1	bridas junta 1	sección brida junta 1
1	491.5	11	11	11	300	300	300	449	405.5	300	6	300	250	6	363	250	1	250	319.5
2	491.5	14	14	14	300	300	300	449	405.5	300	9	300	250	9	363	250	4	250	319.5
3	491.5	19	19	19	300	300	300	449	405.5	300	14	300	250	14	363	250	9	250	319.5
4	491.5	26	26	26	300	300	300	449	405.5	300	21	300	250	21	363	250	16	250	319.5
5	491.5	35	35	35	300	300	300	449	405.5	300	30	300	250	30	363	250	25	250	319.5
6	491.5	46	46	46	300	300	300	449	405.5	300	41	300	250	41	363	250	36	250	319.5
7	491.5	59	59	59	300	300	300	449	405.5	300	54	300	250	54	363	250	49	250	319.5
8	491.5	74	74	74	300	300	300	449	405.5	300	69	300	250	69	363	250	64	250	319.5
9	491.5	91	91	91	300	300	300	449	405.5	300	86	300	250	86	363	250	81	250	319.5
10	491.5	110	110	110	300	300	300	449	405.5	300	105	300	250	105	363	250	100	250	319.5
11	491.5	131	131	131	300	300	300	449	405.5	300	126	300	250	126	363	250	121	250	319.5
12	491.5	154	154	154	300	300	300	449	405.5	300	149	300	250	149	363	250	144	250	319.5
13	491.5	179	179	179	300	300	300	449	405.5	300	174	300	250	174	363	250	169	250	319.5
14	491.5	206	206	206	300	300	300	449	405.5	300	201	300	250	201	363	250	196	250	319.5
15	491.5	235	235	235	300	300	300	449	405.5	300	230	300	250	230	363	250	225	250	319.5
16	491.5	266	266	266	300	300	300	449	405.5	300	261	300	250	261	363	250	256	250	319.5
17	491.5	299	299	299	300	300	300	449	405.5	300	294	300	250	294	363	250	289	250	319.5
18	491.5	334	334	334	300	300	300	449	405.5	300	329	300	250	329	363	250	324	250	319.5
19	491.5	371	371	371	300	300	300	449	405.5	300	366	300	250	366	363	250	361	250	319.5
20	491.5	410	410	410	300	300	300	449	405.5	300	405	300	250	405	363	250	400	250	319.5
21	491.5	494	494	494	300	300	300	449	405.5	300	489	300	250	489	363	250	484	250	319.5
22	491.5	586	586	586	300	300	300	449	405.5	300	581	300	250	581	363	250	576	250	319.5
23	491.5	686	686	686	300	300	300	449	405.5	300	681	300	250	681	363	250	676	250	319.5
24	491.5	794	794	794	300	300	300	449	405.5	300	789	300	250	789	363	250	784	250	319.5
25	491.5	910	910	910	300	300	300	449	405.5	300	905	300	250	905	363	250	900	250	319.5
26	491.5	1034	1034	1034	300	300	300	449	405.5	300	1029	300	250	1029	363	250	1024	250	319.5
27	491.5	1166	1166	1166	300	300	300	449	405.5	300	1161	300	250	1161	363	250	1156	250	319.5
28	491.5	1306	1306	1306	300	300	300	449	405.5	300	1301	300	250	1301	363	250	1296	250	319.5
29	491.5	1454	1454	1454	300	300	300	449	405.5	300	1449	300	250	1449	363	250	1444	250	319.5
30	491.5	1610	1610	1610	300	300	300	449	405.5	300	1605	300	250	1605	363	250	1600	250	319.5

iteración	sección brida junta2	sección brida junta3	sección brida junta4	sección brida junta5	cartela infsec1	pernosjunta1	pernojunta2	pernojunta1	pernosjunta2	pernojunta3	pernosjunta3	pernojunta4	pernosjunta4	pernojunta5	pernosjunta6	deformación máxima
1	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	387.070984
2	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	387.540009
3	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	388.322052
4	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	389.418335
5	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	390.830139
6	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	392.559296
7	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	394.608276
8	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	396.979614
9	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	399.676575
10	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	402.702881
11	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	406.062897
12	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	409.761353
13	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	413.803619
14	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	418.195709
15	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	422.944122
16	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	428.056061
17	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	433.539215
18	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	439.402069
19	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	445.653564
20	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	452.303467
21	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	466.84024
22	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	483.103058
23	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	501.193481
24	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	521.224426
25	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	543.320679
26	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	567.619385
27	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	594.270386
28	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	623.437378
29	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	655.297974
30	55.25	67.98	71.86	84.52	88.45	170.419	9.525	9.525	183.057	11.1125	210.494	11.1125	222.53	12.7	250.103	690.044861

ANEXO 9

Resultados de casos de optimización de juntas con 8 pernos

	PERNOS					BRIDAS											
	Cant.	D Agujeros	D Ext [in]	D Ext [mm]	Área	D Ext	d int	Área	Área con agujeros	Sy [MPa]	Densidad [kg/m3]	Espesor [mm]	15	20	25	30	35
JUNTA1	8	650	3/4	19,05	285,02	750	400	316122,76	313842,58	250	7860	Volumen [m3]	0,0047	0,0063	0,0078	0,0094	0,0110
												Masa [kg]	37,00	49,34	61,67	74,00	86,34
												Deflexión máxima [mm]	596,22	510,86	463,71	435,08	416,51
												Esfuerzo [MPa]	165,25	92,75	59,24	41,04	30,04
												Factor de seguridad	1,51	2,70	4,22	6,09	8,32
JUNTA2	8	750	3/4	19,05	285,02	850	450	408407,04	406126,86	250	7860	Espesor [mm]	20	25	30	35	40
												Volumen [m3]	0,0081	0,0102	0,0122	0,0142	0,0162
												Masa [kg]	63,84	79,80	95,76	111,73	127,69
												Deflexión máxima [mm]	596,22	510,86	463,71	435,08	416,51
												Esfuerzo [MPa]	214,82	132,94	89,65	64,00	47,70
Factor de seguridad	1,16	1,88	2,79	3,91	5,24												
JUNTA3	8	850	7/8	22,225	387,95	950	500	512472,30	509368,72	250	7860	Espesor [mm]	20	25	30	35	40
												Volumen [m3]	0,0102	0,0127	0,0153	0,0178	0,0204
												Masa [kg]	80,07	100,09	120,11	140,13	160,15
												Deflexión máxima [mm]	596,22	510,86	463,71	435,08	416,51
												Esfuerzo [MPa]	304,79	187,51	125,61	89,33	66,30
Factor de seguridad	0,82	1,33	1,99	2,80	3,77												
JUNTA4	8	950	7/8	22,225	387,95	1050	550	628318,53	625214,95	250	7860	Espesor [mm]	25	30	35	40	45
												Volumen [m3]	0,0156	0,0188	0,0219	0,0250	0,0281
												Masa [kg]	122,85	147,43	172,00	196,57	221,14
												Deflexión máxima [mm]	596,22	510,86	463,71	435,08	416,51
												Esfuerzo [MPa]	223,84	150,22	107,68	80,77	62,62
Factor de seguridad	1,12	1,66	2,32	3,10	3,99												
JUNTA5	8	1050	1	25,4	506,71	1150	600	755945,73	751892,07	250	7860	Espesor [mm]	25	30	35	40	45
												Volumen [m3]	0,0188	0,0226	0,0263	0,0301	0,0338
												Masa [kg]	147,75	177,30	206,85	236,39	265,94
												Deflexión máxima [mm]	596,22	510,86	463,71	435,08	416,51
												Esfuerzo [MPa]	263,68	177,19	126,27	94,20	72,74
Factor de seguridad	0,95	1,41	1,98	2,65	3,44												

Resultados de casos de optimización de juntas con 16 pernos

	PERNOS					BRIDAS											
	Cant.	D Agujeros	D Ext [in]	D Ext [mm]	Área	D Ext	d int	Área	Área con agujeros	Sy [MPa]	Densidad [kg/m ³]	Espesor [mm]	5	10	15	20	25
JUNTA1	16	650	3/4	19,05	285,02	750	400	316122,76	311562,39	250	7860	Volumen [m ³]	0,0016	0,0031	0,0047	0,0062	0,0078
												Masa [kg]	12,24	24,49	36,73	48,98	61,22
												Deflexión máxima [mm]	628,10	483,55	433,40	408,68	394,53
												Esfuerzo [MPa]	563,79	170,69	78,65	44,02	27,79
												Factor de seguridad	0,44	1,46	3,18	5,68	8,99
JUNTA2	16	750	3/4	19,05	285,02	850	450	408407,04	403846,68	250	7860	Espesor [mm]	10	15	20	25	30
												Volumen [m ³]	0,0040	0,0061	0,0081	0,0101	0,0121
												Masa [kg]	31,74	47,61	63,48	79,36	95,23
												Deflexión máxima [mm]	628,10	483,55	433,40	408,68	394,53
												Esfuerzo [MPa]	366,25	160,55	87,72	54,81	37,33
Factor de seguridad	0,68	1,56	2,85	4,56	6,70												
JUNTA3	16	850	7/8	22,225	387,95	950	500	512472,30	506265,13	250	7860	Espesor [mm]	10	15	20	25	30
												Volumen [m ³]	0,0051	0,0076	0,0101	0,0127	0,0152
												Masa [kg]	39,79	59,69	79,58	99,48	119,38
												Deflexión máxima [mm]	628,10	483,55	433,40	408,68	394,53
												Esfuerzo [MPa]	492,71	223,75	123,90	77,09	51,95
Factor de seguridad	0,51	1,12	2,02	3,24	4,81												
JUNTA4	16	950	7/8	22,225	387,95	1050	550	628318,53	622111,36	250	7860	Espesor [mm]	15	20	25	30	35
												Volumen [m ³]	0,0093	0,0124	0,0156	0,0187	0,0218
												Masa [kg]	73,35	97,80	122,24	146,69	171,14
												Deflexión máxima [mm]	628,10	483,55	433,40	408,68	394,53
												Esfuerzo [MPa]	282,60	155,63	96,42	65,06	46,70
Factor de seguridad	0,88	1,61	2,59	3,84	5,35												
JUNTA5	16	1050	1	25,4	506,71	1150	600	755945,73	747838,41	250	7860	Espesor [mm]	15	20	25	30	35
												Volumen [m ³]	0,0112	0,0150	0,0187	0,0224	0,0262
												Masa [kg]	88,17	117,56	146,95	176,34	205,73
												Deflexión máxima [mm]	628,10	483,55	433,40	408,68	394,53
												Esfuerzo [MPa]	323,50	183,34	114,98	77,38	54,97
Factor de seguridad	0,77	1,36	2,17	3,23	4,55												

Resultados de casos de optimización de juntas con 24 pernos

	PERNOS					BRIDAS											
	Cant.	D Agujeros	D Ext [in]	D Ext [mm]	Área	D Ext	d int	Área	Área con agujeros	Sy [MPa]	Densidad [kg/m ³]	Espesor [mm]	5	10	15	20	25
JUNTA1	24	650	3/4	19,05	285,02	750	400	316122,76	309282,21	250	7860	Volumen [m ³]	0,0015	0,0031	0,0046	0,0062	0,0077
												Masa [kg]	12,15	24,31	36,46	48,62	60,77
												Deflexión máxima [mm]	480,53	417,31	395,55	384,82	378,57
												Esfuerzo [MPa]	329,21	99,67	48,24	27,72	17,63
												Factor de seguridad	0,76	2,51	5,18	9,02	14,18
JUNTA2	24	750	3/4	19,05	285,02	850	450	408407,04	401566,49	250	7860	Espesor [mm]	10	15	20	25	30
												Volumen [m ³]	0,0040	0,0060	0,0080	0,0100	0,0120
												Masa [kg]	31,56	47,34	63,13	78,91	94,69
												Deflexión máxima [mm]	480,53	417,31	395,55	384,82	378,57
												Esfuerzo [MPa]	188,64	88,52	50,58	32,26	22,31
Factor de seguridad	1,33	2,82	4,94	7,75	11,20												
JUNTA3	24	850	7/8	22,225	387,95	950	500	512472,30	503161,55	250	7860	Espesor [mm]	10	15	20	25	30
												Volumen [m ³]	0,0050	0,0075	0,0101	0,0126	0,0151
												Masa [kg]	39,55	59,32	79,10	98,87	118,65
												Deflexión máxima [mm]	480,53	417,31	395,55	384,82	378,57
												Esfuerzo [MPa]	245,72	116,36	67,99	44,02	30,52
Factor de seguridad	1,02	2,15	3,68	5,68	8,19												
JUNTA4	24	950	7/8	22,225	387,95	1050	550	628318,53	619007,78	250	7860	Espesor [mm]	15	20	25	30	35
												Volumen [m ³]	0,0093	0,0124	0,0155	0,0186	0,0217
												Masa [kg]	72,98	97,31	121,64	145,96	170,29
												Deflexión máxima [mm]	480,53	417,31	395,55	384,82	378,57
												Esfuerzo [MPa]	146,39	84,23	53,93	36,99	26,73
Factor de seguridad	1,71	2,97	4,64	6,76	9,35												
JUNTA5	24	1050	1	25,4	506,71	1150	600	755945,73	743784,75	250	7860	Espesor [mm]	15	20	25	30	35
												Volumen [m ³]	0,0112	0,0149	0,0186	0,0223	0,0260
												Masa [kg]	87,69	116,92	146,15	175,38	204,62
												Deflexión máxima [mm]	480,53	417,31	395,55	384,82	378,57
												Esfuerzo [MPa]	166,88	97,05	62,95	43,61	31,64
Factor de seguridad	1,50	2,58	3,97	5,73	7,90												

ANEXO 10

ALGORITMO PARA LA UTILIZACIÓN DE METAMODELO DE SIMULACIÓN

