

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

TEMA: “Análisis de juntas tipo bridas apernadas para estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolo usando el método de elementos finitos”

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas

Modalidad del Trabajo: Proyecto de titulación con componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo.

Autor: Ing. Dany Germán Muyulema Muyulema

Director: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

Ambato – Ecuador

2023

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg. e Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “ANÁLISIS DE JUNTAS TIPO BRIDAS APERNADAS PARA ESTRUCTURAS DE TELECOMUNICACIONES DE TIPO MONOPOLO USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”, elaborado y presentado por el señor, Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema, para optar por el Título de cuarto nivel de Magister en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg.

Miembro del Tribunal

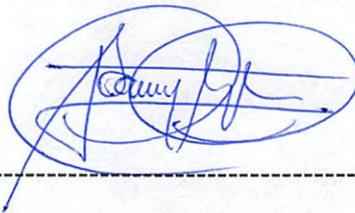


Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

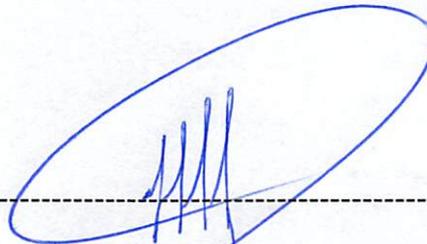
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación, presentado con el tema: ANÁLISIS DE JUNTAS TIPO BRIDAS APERNADAS PARA ESTRUCTURAS DE TELECOMUNICACIONES DE TIPO MONOPOLO USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, le corresponde exclusivamente a: Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema, Autor bajo la Dirección del Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg., Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema

c.c.: 1804015392

AUTOR



Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

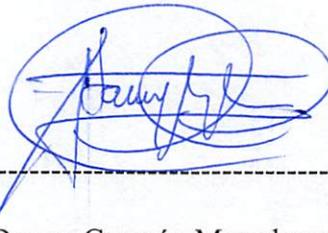
c.e.: 1803605540

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema

c.c.: 1804015392

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
DEDICATORIA	xiv
AGRADECIMIENTO.....	xv
RESUMEN EJECUTIVO	xvi
EXECUTIVE SUMMARY.....	xviii
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II	5
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	5
2.1. Estudios previos en donde se ha utilizado el método de elementos finitos para análisis estructural en estructuras de telecomunicaciones.	5
2.2. Método de elementos finitos (MEF).....	9
2.3. Análisis estático no lineal.....	9

2.3.1.	No linealidad geométrica.....	9
2.3.2.	No linealidad de material.....	10
2.4.	Análisis por elementos finitos para juntas de bridas apernadas.....	11
2.5.	Método explícito e implícito	11
2.6.	Modelamiento de contacto entre cuerpos en el método de elementos finitos.	12
2.6.1.	Contacto tipo bonded.....	12
2.6.2.	Contacto tipo sin fricción (Frictionless).....	12
2.7.	Monopolos.....	13
2.8.	Juntas soldadas utilizadas en la construcción de monopolos de telecomunicaciones.....	14
2.9.	Junta de penetración completa (CJP)	14
2.10.	Junta de penetración parcial (PJP).....	14
2.11.	Ensayo de carga lateral.....	15
Capítulo iii.....		16
Marco metodológico		16
3.1.	Ubicación.....	16
3.2.	Equipos usados en el ensayo de carga lateral monotónica.....	16
3.2.2.	Celda de carga:.....	16
3.2.3.	Cilindro hidráulico hueco	17
3.2.4.	Sensores LVDT.....	17
3.2.5.	Cilindro hidráulico 100 Ton:	18
3.3.	Equipos utilizados en la construcción de los especímenes de prueba.....	19
3.4.	Materiales.....	20
3.4.1.	Acero ASTM A36.....	20
3.4.2.	Modelo de material para el acero ASTM A36.....	20

3.4.3.	Pernos estructurales galvanizados.	21
3.4.4.	Modelo de material para los pernos estructurales galvanizados ASTM A325. 22	
3.4.5.	Cálculo de los pernos según ASCE 48	23
3.4.6.	Proceso de soldadura	24
3.5.	Cimentación.....	24
3.5.1.	Varilla micro aleada NTE-INEN 2167.....	24
3.5.2.	Placa de anclaje circular espesor 12 mm	24
3.5.3.	Hormigón.....	25
3.6.	Tipo de investigación	25
3.7.	Hipótesis.....	25
3.7.1.	Variable dependiente.	26
3.7.2.	Variable Independiente.....	26
3.7.3.	Operacionalización de variables.....	26
3.7.4.	Variable independiente	26
3.7.5.	Población o muestra:.....	27
3.7.6.	Recolección de información:	27
3.10.1.	Procesamiento de la información.....	30
CAPÍTULO IV.....		38
Resultados y discusión		38
4.1.1.	Esfuerzo equivalente Von Mises modelo 01-MNP-MEF.....	38
4.1.2.	Esfuerzo equivalente Von Mises modelo 02-MNP-MEF.....	39
4.1.3.	Curva de esfuerzo vs fuerza general (comparación entre modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2)	40
4.1.4.	Curva de carga vs esfuerzo equivalente máximo localizado en la brida superior (BR-SUP) modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2	41

4.1.5.	Curva de carga vs esfuerzo equivalente máximo localizado brida inferior (BR-INF) modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2	41
4.1.6.	Porcentaje de plastificación (MEF)	42
4.1.7.	Porcentaje de plastificación real.	43
4.2.	Resultados de deformación en el modelo 01-MNP-MEF	47
4.2.1.	Deformación máxima medida.....	48
4.2.2.	Curvas fuerza vs deformación máxima, comparación de los modelos de elementos finitos con el primer espécimen de prueba	50
4.2.3.	Curvas fuerza vs deformación máxima, comparación de los modelos de elementos finitos con el segundo espécimen de prueba.....	50
4.2.4.	Deformación direccional localizada de la brida intermedia superior.	51
5.1.1.	Curvas fuerza vs deformación localizada, brida intermedia superior, comparación de los modelos de elementos finitos con el primer espécimen de prueba.	53
5.1.2.	Curvas fuerza vs deformación localizada brida intermedia superior, comparación de los modelos de elementos finitos con el segundo espécimen de prueba.	54
5.1.3.	Deformación direccional localizada brida intermedia inferior comparativa de ambos modelos de elementos finitos.....	55
5.1.4.	Curvas fuerza vs deformación localizada brida intermedia inferior, comparación de los modelos de elementos finitos.....	56
Capítulo v	64
Conclusiones y recomendaciones	64
5.1.	Conclusiones.....	64
5.2.	Recomendaciones.....	66
BIBLIOGRAFÍA	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1. Comportamiento de los contactos bonded y Frictionless empleados en el modelo matemático de elementos finitos; μ : rugosidad [27].	13
Tabla 3- 1. Espesores de Plancha de acero ASTM A36 para cada parte de los especímenes de prueba.	20
Tabla 3- 2. Propiedades del acero ASTM A36 [35].	20
Tabla 3- 3. Propiedades de los pernos ASTM A 325.	21
Tabla 3- 4. Propiedades de la curva bilineal del material de los pernos ASTM A325 estructurales [36].	22
Tabla 3- 5. Dosificación de componentes para el hormigón f^c 300 [37].	25
Tabla 3- 6. Propiedades del hormigón f^c 300 [37].	25
Tabla 3- 5. Operacionalización de variables variable dependiente.	26
Tabla 3- 6. Operacionalización de la variable independiente	26
Tabla 3- 7. Identificación de los modelos de elementos finitos y especímenes de prueba.	30
Tabla 3- 8. Resultados obtenidos con el método de elementos finitos.	31
Tabla 3- 9. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.	33
Tabla 4- 1. Esfuerzo equivalente Von Mises del prototipo de brida apernada por MEF.	38
Tabla 4- 2. Esfuerzo equivalente Von Mises del prototipo de brida apernada por MEF (Modelo Simplificado).	39
Tabla 4- 3. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 01-MNP-MEF	42
Tabla 4- 4. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 02-MNP-MEF	43

Tabla 4- 5. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 01-OCT5-BR6-MEF	44
Tabla 4- 6. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 02-OCT5-BR6.....	45
Tabla 4- 7. Comparación de los porcentajes de plastificación obtenidos por MEF y experimentales.....	46
Tabla 4- 8. Resultados de la deformación total del prototipo 01-MNP-MEF.....	47
Tabla 4- 9. Resultados de la deformación total del prototipo 02-MNP-MEF.....	48
Tabla 4- 10. Resultados de deflexión máxima de los modelos de elementos finitos y medidos con el sensor LVDT 1 en la parte superior de los especímenes de prueba..	49
5. Tabla 4- 11. Deformación direccional máxima localizada, brida intermedia superior, resultados del análisis MEF y ensayos físicos.	51
Tabla 4- 12. Comparación de resultados de deformación de brida superior MEF y experimental.....	52
Tabla 4- 13. Resultados de deformación máxima localizada de la brida intermedia inferior obtenidos de los modelos de elementos finitos.	55
Tabla 4- 14. Deformación vertical local de la parte posterior de la brida apernada ..	56
Tabla 4- 15. Resultados del ensayo: Deformaciones locales del parte posterior de la brida del prototipo de monopolo, validado con análisis 01-MNP-MEF.....	58
Tabla 4- 16. Deformación local de la brida de la base.....	59
Tabla 4- 17. Resultados del ensayo: Deformaciones locales de la placa base del prototipo de monopolo, simulación 01-MNP-MEF.....	60
Tabla 4- 18. Deformación máxima medida en los ensayos de carga lateral para los especímenes 01-OCT5-BR6 y 02-OCT5-BR6 validados con las deformaciones máximas obtenidas en el análisis 01-MNP-MEF.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2- 1. Representación gráfica de la no linealidad geométrica de un material[21].	10
Figura 2- 2.Diagrama esfuerzo deformación de un material no lineal [21].	10
Figura 2- 3. Diferencias entre el método implícito y explícito relacionado con la no linealidad y el comportamiento del sistema, sea estático o dinámico [24].	11
Figura 2- 4. Dos Cuerpos en contacto pueden presentar diferente comportamiento que se relaciona con la fricción y la rugosidad [26].	12
Figura 2- 5. Conexión de brida apernada y sus componentes en la unión de dos elementos estructurales [28]......	13
Figura 2- 6. Monopolo de sección poligonal unido mediante bridas apernadas [29].	14
Figura 2- 7. Junta de penetración completa (CJP) [32]......	14
Figura 2- 8. Junta de penetración parcial (PJP) [32].Figura 2- 9.....	15
Figura 2- 10. Ensayo de carga lateral con muro y losa de reacción en una estructura metálica Normas aplicadas en el ensayo de carga lateral del monopolo de telecomunicaciones [34]......	15
Figura 3- 1. Acople de la celda de carga entre el cilindro y la parte superior del espécimen de prueba [34]......	16
Figura 3- 2. Cilindro hidráulico hueco en la aplicación de la presión para el perno en la losa de reacción [34].	17
Figura 3- 3. Sensor LVDT para la medición del desplazamiento vertical de la placa base [34]......	18
Figura 3- 4. Cilindro hidráulico de 100 Ton anclado al muro de reacción [34].	18
Figura 3- 5. Curva de esfuerzo deformación del acero ASTM A36 no lineal [35]....	21
Figura 3- 6. Pretensión de los pernos ASTM A325.	22
Figura 3- 6. Montaje de hierros de la cimentación de hormigón armado [Autor]	24
Figura 3- 7. Partes del monopolo [Autor]	27
Figura 3- 8. Partes de la junta de brida apernada [Autor]	28

Figura 3- 9. Puntos de medición de deformaciones generales en el monopolo con sensores LVDT.....	29
Figura 3- 10. Puntos de medición de deformaciones en la junta de brida apernada con sensores LVDT.....	29
Figura 4- 1. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada, la curva azul corresponde al esfuerzo máximo del modelo MEF completo, la roja al modelo simplificado.....	40
Figura 4- 2. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada en la brida intermedia superior, modelo completo y simplificado [Autor (Resultados del análisis MEF)] ..	41
Figura 4- 3. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada en la brida intermedia superior, modelo completo y simplificado [Autor (Resultados del análisis MEF)] ..	41
Figura 4- 4. Curva de fuerza vs deformación máxima obtenida en el primer espécimen de prueba a) MNP-MEF-1 b) MNP-MEF-2.....	50
Figura 4- 5. Curva de fuerza vs deformación máxima, comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer y segundo espécimen de prueba.....	50
Figura 4- 6. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior, BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos completo y los resultados del primer espécimen de prueba	53
Figura 4- 7. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer espécimen de prueba	53
Figura 4- 8. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos completo y los resultados del primer espécimen de prueba	54
Figura 4- 9. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer espécimen de prueba.....	54
Figura 4- 12. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia inferior BR-INF.....	56

Figura 4- 13. Curvas de fuerza vs deformación local de la parte posterior de la brida apertada en el lado opuesto de la cara de aplicación de carga [Autor (Resultados del análisis MEF)].....	57
Figura 4- 14. Curvas de fuerza vs deformación local de la brida de la base comparación con el primer espécimen de prueba [Autor (Resultados del análisis MEF)].....	61

DEDICATORIA

Este éxito va dedicado a los seres más importantes de mi vida:

*En primer lugar, esta victoria es para **DIOS**, ya que el tiempo de él es perfecto, A Él que me ha dado la fuerza, la sabiduría y el coraje para después de muchos años empezar a estudiar y terminar con mucho esfuerzo la meta trazada.*

*A mis hermosos Hijos: **Alejito y Micaela** que ha sido mi inspiración y el motor para cumplir cada objetivo que me he propuesto en mi vida. Se que sus abrazos, sus tiernos besos y sobre todo sus locuras permitieron que este proceso sea muy hermoso y que haya valido la pena cada instante. Espero ser un ejemplo para sus vidas.*

*Así también, A mi esposa **Anita Elizabeth** quiero agradecerte infinitamente, quien durante estos últimos años ha estado junto a mí, apoyándome en las buenas, pero sobre todo en las malas y siendo mi motor para avanzar, pese a un millón de inconvenientes que hemos tenido que sortearlos, estoy a un paso de cumplir con el objetivo. ¡¡¡¡Un gracias se queda corto para todo lo que has hecho por mí, este logro también es tuyo!!!!*

*Finalmente, dedicado a toda mi **familia**: hermanos, sobrinas y cuñadas que sin dudas son piezas importantes dentro del desarrollo de la vida.*

Danny Germán Muyulema Muyulema.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por permitirme educarme una vez más en sus aulas y permitirme recibir los conocimientos necesarios para formarme como profesional, pero sobre todo como persona.

A mis queridos docentes quienes supieron transmitir sus valiosos conocimientos y experiencias vividas con gran sabiduría.

Al Ing. Diego Carranza, quien con su amistad y conocimiento ha sido una persona muy influyente dentro del programa de la maestría.

Al Ing. Francisco Peña, quien con sus conocimientos y profesionalismo fue una gran guía para el desarrollo de cada una de las etapas del presente proyecto.

Danny Germán Muyulema Muyulema.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS

TEMA:

ANÁLISIS DE JUNTAS TIPO BRIDAS APERNADAS PARA ESTRUCTURAS DE TELECOMUNICACIONES DE TIPO MONOPOLO USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

MODALIDAD DE TITULACIÓN: Proyecto de titulación con componentes de Investigación Aplicada y/o de Desarrollo

AUTOR: Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema

DIRECTOR: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

FECHA: Veinte y siete de enero de 2023

RESUMEN EJECUTIVO

Las estructuras tipo monopolo son utilizadas como torres de telecomunicaciones especialmente en áreas urbanas donde la zonificación es difícil. La hipótesis de carga que predomina su diseño es la de viento, ya que la mayoría de los colapsos se deben a este efecto. La parte más crítica que es más propensa a fallar en las torres es la junta de brida apernada por lo que requiere un enfoque especial en el diseño que garantice su resistencia y desempeño a lo largo del tiempo. En la presente investigación se obtuvo un modelo de elementos finitos que se aproximó al comportamiento estructural real de las juntas de brida apernada. Los modelos de elementos finitos se desarrollaron en un software especializado y para su validación se efectuaron ensayos de carga lateral monotónica. Los resultados obtenidos mediante las medidas correspondientes a cargas y desplazamientos en los ensayos se compararon con los obtenidos en el modelo de elementos finitos, evidenciando variaciones no significativas en los puntos

de interés de la brida apernada. El modelo de elementos finitos planteado fue útil para predecir el comportamiento estructural de las bridas dinamizando el proceso de diseño.

DESCRIPTORES: BRIDA APERNADA, CARGA LATERAL, DEFORMACIÓN, ELEMENTOS FINITOS, MONOPOLO, TORRE DE TELECOMUNICACIONES

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS

THEME:

ANALYSIS OF BOLTED FLANGED JOINTS FOR MONOPOLE TYPE
TELECOMMUNICATIONS STRUCTURES USING THE FINITE ELEMENT
METHOD

TITULATION MODALITY: Degree project with applied research and/or development components.

AUTHOR: Ing. Danny Germán Muyulema Muyulema

DIRECTOR: Ing. Francisco Agustín Peña Jordán, MSc., Mg.

DATE: January 27, 2023

EXECUTIVE SUMMARY

Monopole structures are used as telecommunication towers, especially in urban areas where zoning is difficult. The load hypothesis that predominates their design is wind, since most of the collapses are due to this effect. The most critical part that is more prone to failure in the towers is the bolted flange joint, which requires a special focus in the design to guarantee its resistance and performance over time. In the present investigation, a finite element model was obtained that approximated the actual structural behavior of bolted flange joints. The finite element models were developed in a specialized software and monotonic lateral load tests were performed for their validation. The results obtained by measuring loads and displacements in the tests were compared with those obtained in the finite element model, showing non-significant variations in the points of interest of the bolted flange. The finite element model was useful for predicting the structural behavior of the flanges, making the design process more dynamic.

DESCRIPTORS: BOLTED FLANGE, LATERAL LOAD, DEFORMATION, FINITE ELEMENT, MONOPOLE, TELECOMMUNICATION TOWER

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.Introducción.

El presente trabajo de investigación ha sido concebido considerando la importancia de las estructuras tipo monopolo en las telecomunicaciones, puesto que son construcciones que albergan equipos costosos de los cuales dependen cientos de usuarios para poder comunicarse. Este tipo de estructuras son muy demandadas en zonas pobladas por su discreción y conservación del paisajismo urbano. El diseño de estas estructuras debe garantizar seguridad y estabilidad para prevenir accidentes o imprevistos que pongan en riesgo la vida y la integridad de la población que desarrolla sus actividades cotidianas en zonas aledañas a estas construcciones.

Generalmente los monopolos se componen de perfiles tubulares de sección circular o poligonal unidos por juntas de bridas apernadas, que son las partes más críticas de estas estructuras, debido a las cargas estáticas, sísmicas y de viento que soportan, las cuales concentran esfuerzos de diferente tipo que pueden ocasionar la falla de los componentes.

En la actualidad existen varios métodos computacionales para conocer el comportamiento estructural como es el caso del método de elementos finitos el cual permite desarrollar prototipos virtuales capaces de simular las condiciones reales a las que están sometidas las estructuras. Mediante este método numérico se pueden obtener resultados de deformación, esfuerzos, fuerzas internas de elementos, fatiga, entre otros; La finalidad de usar estos métodos es obtener aproximaciones a los fenómenos que ocurren en modelos reales, sin embargo es necesaria la validación de los resultados obtenidos con ensayos físicos para lograr una mayor confiabilidad de resultados y generar modelos matemáticos capaces de predecir el comportamiento estructural real.

Para conocer el comportamiento estructural de las conexiones de bridas apernadas en monopolos de telecomunicaciones inicialmente se definieron las condiciones de carga y la geometría y se planteó un modelo matemático por medio de elementos finitos que posteriormente fue validado mediante ensayos físicos a escala reducida, los resultados obtenidos son un aporte para plantear diseños más resistentes que garanticen la funcionalidad de la estructura y llegar a concebir optimizaciones de diseño en la

estructura de los monopolos, empleando una menor cantidad de material y mejorando la resistencia de las juntas de bridas apernadas ante la acción de las cargas.

El modelo matemático por medio de elementos finitos fue y validado mediante ensayos físicos permitirá determinar el comportamiento de las juntas de bridas apernadas mediante el uso de modelos computacionales, para lograr diseños más consistentes y a la vez optimizando la cantidad de material utilizado.

1.2.Justificación

La comunicación en el Ecuador ha evolucionado a lo largo de los años, pasando de los métodos tradicionales hasta los más sofisticados que existen hoy en día, por esta situación surge la necesidad de implementar equipos más sofisticados que requieren infraestructura específica para poder funcionar [1], principalmente en la telefonía celular y el internet móvil se utilizan estructuras altas para albergar equipos y mejorar la cobertura, dentro de estas están los monopolos, los cuales son ampliamente utilizados en lugares donde se requiere conservar la estética porque ocupan menos espacio a diferencia de otros tipos, de estructuras compuestas por tubos de sección circular o poligonal, y en elevación pueden ser de sección constante o cónica [1]. Se fabrican hasta alturas límite de 42 metros, aunque no se limita para mayores alturas.

Las secciones tubulares o poligonales se unen mediante bridas empernadas que son las partes más críticas de este tipo de estructuras puesto que allí se concentran momentos y esfuerzos producto del peso propio y las acciones de viento [2]. Actualmente varias compañías de telecomunicaciones optan por este tipo de estructuras las que son instaladas generalmente en zonas pobladas donde el espacio es reducido además es necesario conservar la estética [3].

Las partes más críticas de las conexiones de los monopolos son las bridas las cuales son unidas con pernos de pretensión que cumplen los estándares ASTM 325 y ASTM 490, el diseño comprende las juntas que se unen metal con metal, en ambos casos se analizan deformaciones, fuerzas y momentos producto de las sollicitaciones de las juntas, sin embargo se presentan varias falencias como la fatiga y los esfuerzos excesivos de contacto entre las uniones [4].

Plantear metodologías de diseño confiable que garanticen la durabilidad y resistencia de la junta es muy importante, dado que existe ambigüedad en algunos casos de su comportamiento, principalmente en los elementos más críticos como los pernos y la

zona de contacto, por ello es necesario desarrollar modelos que permitan conocer más a detalle el comportamiento estructural de estos elementos [5].

La necesidad de realizar el presente trabajo de investigación surge por la creciente demanda de este tipo de estructuras en el sector de las telecomunicaciones, debido a que cada año existen nuevas tecnologías que obliga a las empresas a contar con equipos más sofisticados para cubrir la demanda del uso de telefonía móvil [6]. Además es necesario que las estructuras de telecomunicaciones cumplan con las disposiciones establecidas en las normas ANSI TIA/EIA 222G la cual establece la zonificación, que implica un dimensionamiento adecuado su geometría y optimizando recursos, la norma en mención incluye variables de diseño como la velocidad del viento, cálculo de cargas, zonificación y las cargas aplicadas así como la mano de obra, montaje y consideraciones de obra civil como las cimentaciones entre otras [2].

Teniendo en cuenta que las bridas apernadas de los monopolos de telecomunicaciones son una parte crítica de la estructura porque al unir todos los miembros estructurales del conjunto están sometidas a cargas de distinto tipo principalmente de viento, que las hace susceptibles a fallar por tal motivo hay la presente investigación se enfocó en el estudio del comportamiento estructural de la junta, mediante un modelo de elementos finitos y un modelo físico experimental a escala teniendo en cuenta las condiciones de carga y condiciones de frontera adecuados para obtener resultados reales, esto permitirá conocer las sollicitaciones de estos sistemas y tomar acciones para mejorarlos y desarrollar diseños más seguros, identificando aspectos esenciales sobre su comportamiento estructural basados en normativa aplicable.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento de juntas tipo bridas apernadas para estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolo utilizando el método de elementos finitos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer las condiciones de carga a las que se encuentran sometidas las estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolo.
- Plantear un modelo por medio del método de elementos finitos para las juntas tipo bridas apernadas, utilizadas en estructuras de telecomunicaciones tipo monopolo facetado.
- Validar la modelación matemática obtenida por medio del método de elementos finitos mediante un modelo de ensayo experimental a escala.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El análisis de comportamiento estructural de juntas tipo bridas apernadas para estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolo usando el método de elementos finitos tiene como objetivo desarrollar un modelo matemático que permita predecir el desempeño estructural en modelos reales para garantizar la resistencia de las juntas.

2.1. Estudios previos en donde se ha utilizado el método de elementos finitos para análisis estructural en estructuras de telecomunicaciones.

En la investigación de [3] se destaca que las estructuras que soportan equipos de telecomunicaciones son de gran importancia por la función que cumplen, con el aumento de la demanda de servicios móviles, los equipos son de mayores dimensiones y las estructuras deben ser más robustas, en algunos casos conviene realizar refuerzos debido a limitaciones relacionadas con el acceso a terrenos más amplios. El aumento de dispositivos que soportan las estructuras incrementa las solicitaciones de carga, por ese motivo, es necesario reforzar las estructuras para aumentar su capacidad a compresión y tensión.

En las estructuras de telecomunicaciones que se encuentran unidas por bridas se produce el efecto de flexión, además de los efectos producidos por las cargas axiales, en este caso, el efecto de palanca origina momentos de flexión. Algunos de los factores que influyen en este efecto son, la pre - tensión de los pernos, número de pernos y el espesor de la brida [4]. Para analizar el comportamiento de las bridas se puede realizar una modelización separada con enfoque de subestructuración, en donde se puede realizar un análisis no lineal aplicando el método de elementos finitos que posteriormente, se puede emplear para estudiar el comportamiento de toda la estructura [4].

Se ha realizado un estudio comparativo entre estructuras de telecomunicaciones de tipo monopolo y autoportantes, para ello se han aplicado cargas de viento a diferentes velocidades, se ha determinado que las estructuras autoportantes poseen un mejor comportamiento en cuanto a desplazamientos, sin embargo, la cantidad de acero que se emplea para construirlas, puede llegar a ser el doble en comparación de las estructuras tipo monopolo [5].

Un aspecto que hace confiable al análisis por elementos finitos es que se pueden incluir las fuerzas de contacto y de fricción, y simular cuando las uniones están bajo tensión, las estructuras de monopolo de telecomunicaciones están sometidas a fuerzas axiales y a momentos de flexión debido al efecto de palanca [6].

También es necesario considerar en el estudio de las juntas de monopolos de telecomunicaciones los efectos de la carga del viento que tienen un gran impacto en el diseño y el comportamiento estructural, [7] ejecutó un análisis dinámico de monopolos flexibles de telecomunicaciones bajo cargas estáticas, armónicas y aleatorias de viento, utilizando elementos finitos no lineales. Los resultados indican que el desplazamiento máximo está en función de la intensidad de la turbulencia del viento, pudiendo llegar hasta los 22 cm.

Para estudiar los diversos efectos del viento sobre la estructura, [8] describe un novedoso algoritmo numérico para la simulación de la respuesta dinámica de las cargas ejercidas por el viento en un prototipo de torres esbeltas bajo vientos turbulentos, utilizando un modelamiento mediante elementos finitos. El algoritmo propuesto se aplicó para derivar las estadísticas de la respuesta dinámica en presencia de incertidumbres en las propiedades estructurales y en la carga del viento.

La conexión de brida flexible es común para las estructuras de tubos circulares, estas uniones soportan una fuerza de tracción o un momento, para simular este tipo de conexión [9] se basó en las características de carga de la conexión de placa de acero en forma de T bajo fuerza de tracción, y obtuvo un modelo simplificado para estudiar la fuerza de apalancamiento y proponer una teoría de cálculo, en la que se asumen los factores de relación de momento y brazo de momento, el análisis paramétrico demuestra que la relación entre el borde exterior y el interior de los pernos, y el espesor de la placa tienen un gran efecto en la fuerza de apriete. Los resultados del cálculo obtenidos en este estudio se ajustan bien a los resultados del análisis por elementos finitos y tienen similitud con el comportamiento estructural real [9].

Por otro lado la resistencia de una conexión desempeña un papel importante en el diseño. Sin embargo, su rigidez puede tener un impacto importante en el comportamiento global de la estructura, en la investigación de la referencia [10] se desarrolló un modelo en el que se supone que todos los componentes de la conexión alcanzan su plena resistencia plástica en el estado final. Por lo tanto, los componentes

de tracción tendrían que ser lo suficientemente "dúctiles" para que la estructura no sea demasiado rígida y debería evitarse el pandeo de la pared del tubo, estas consideraciones pueden ser aplicadas a simulaciones por elementos finitos y estudios destructivos en prototipos a escala pero es necesario considerar la rigidez para tener resultados más aceptables [11].

Típicamente, en las conexiones de bridas apernadas se observa un modo de fallo no dúctil que corresponde al pandeo local de la pared del tubo y al fallo de tres pernos o más en tensión. Las imperfecciones iniciales de las alas desempeñan un papel importante en la evolución de las fuerzas de los pernos durante la carga [12].

En pruebas experimentales mediante cálculos y modelos de elementos finitos por medio de elementos sólidos y de contacto para este tipo de análisis se puede observar la redistribución plástica de las fuerzas de los pernos en presencia de modos de fallo dúctil. También se ha investigado la influencia de la fuerza normal y el grosor de la brida en las resistencias a la flexión [12].

La identificación de la fuerza en los pernos de la conexión de la brida no sólo es importante para preservar la integridad de la estructura, sino también para entender cómo funciona o incluso para mejorar los procedimientos normalizados, en la investigación de [13] se examinó una unión de brida apernada durante un ensayo de tracción estático. Cuatro de los seis pernos estaban equipados con células de carga de arandela. Alternativamente, algunos pernos se equiparon con transductores piezoeléctricos (actuador y sensor) para medir las señales de las ondas elásticas. Se observó que el aumento de la carga provoca cambios en las señales medidas, lo que indica que se presentaron deformaciones significativas que comprometen el desempeño estructural de los pernos.

También hay que destacar que la fluencia de las juntas provoca una reducción de la presión de contacto entre la superficie de una junta y la cara de una brida durante un periodo de tiempo prolongado. Esta reducción puede provocar el posterior fallo de la conexión de brida apernada circular debido a que se afecta la conectividad de los componentes. En el trabajo de [14] se consideraron estos efectos. Los resultados de los análisis de elementos finitos validados experimentalmente indicaron que el número y el tiempo entre los incrementos de apriete de los tornillos, tenían un impacto significativo en el efecto de relajación de la junta luego de ser cargada [14].

Un aumento del número de incrementos de apriete en los pernos, o del tiempo entre los aprietes reducirá el efecto que tiene la relajación de la junta una vez que los pernos han sido fijados. Basándose en estos resultados, es posible desarrollar un esquema de optimización para minimizar el efecto de la relajación de la junta sobre la presión de contacto entre la cara de las bridas, después del asentamiento, aumentando o disminuyendo el apriete de los pernos[14].

En las conexiones de brida apernada se presentan fenómenos de compresión axial, momentos de flexión y cizallamiento coexistentes bajo la combinación de cargas muertas, vivas, de viento o de acción sísmica. El comportamiento es diferente al de las conexiones con bridas utilizadas en tuberías y estructuras de mástiles [15].

Para investigar el comportamiento portante de una conexión sometida a compresión, momentos de flexión y cizallamiento coexistentes, en [16] se aplicaron ensayos estáticos y un análisis de elementos finitos (FEA) a 12 conexiones de brida atornillada entre pilares con diferentes espesores de brida, distancias de los bordes de los pernos, anchos de los bordes de las bridas y diámetros de los orificios de los pernos, así como a un pilar sin conexión [17].

Con ello el autor obtuvo los efectos del espesor de la brida, la distancia del borde del perno, la anchura y el diámetro del agujero sobre la rigidez y la resistencia de las conexiones, los niveles de tensión y las fuerzas de contacto entre las bridas, así como los efectos sobre el modo y los mecanismos de fallo de las conexiones [16].

Otro aporte significativo de la investigación de [16] fue que se comprobó que el grosor de la brida tenía un impacto considerable en el rendimiento de las conexiones, mientras que la distancia del borde del perno y la anchura del borde de la brida tenían un efecto menor. Los resultados del análisis coinciden con los resultados de los ensayos, lo que validó el modelo de elementos finitos. Se obtuvieron algunos resultados de rendimiento que no fue posible estimar mediante ensayos. Basándose en la teoría del límite elástico y en las analogías de los tubos en T, se obtuvo el mecanismo de transferencia de carga de las uniones de brida atornillada y se propusieron modelos matemáticos para calcular la capacidad de carga [16].

Por otro lado, en la investigación de [18] se analizó a fondo el comportamiento de las conexiones mediante un programa de pruebas experimentales y un avanzado análisis de elementos finitos (MEF). En este estudio se llevaron a cabo experimentos con

cuatro tipos de especímenes a escala reducida. Los resultados del análisis MEF cuasi estático avanzado, en el cual se utilizó un solucionador dinámico explícito y un modelo de material de daño dúctil para los pernos, se compararon con los resultados experimentales, esto sirvió para estimar los modos de fallo, las fuerzas de los pernos y la distribución de las tensiones en las placas superiores, las placas rígidas y las placas extremas. Finalmente se propusieron modelos de diseño para pernos de alta resistencia, placas superiores, placas rigidizadas y placas finales.

En todas las investigaciones previas analizadas, las uniones de brida apernada diseñadas según los modelos de elementos finitos (MEF) tienen un comportamiento similar al real por lo que es adecuado desarrollar modelos matemáticos que garanticen un diseño seguro al mismo tiempo mejorando en el rendimiento económico de proyectos de esta índole.

2.2. Método de elementos finitos (MEF)

Es una técnica numérica utilizada para realizar análisis de cualquier fenómeno físico dado, donde es necesario utilizar las matemáticas para comprender y cuantificar de manera integral el comportamiento de algunos elementos mediante modelos 3D, mediante esta técnica se puede conocer el comportamiento estructural o de fluidos, el transporte térmico, la propagación de ondas y otros aspectos describiendo los fenómenos físicos utilizando ecuaciones diferenciales parciales que son resueltos en computadoras mediante técnicas numéricas desarrolladas en forma de software[19].

2.3. Análisis estático no lineal.

En este tipo de análisis se mantiene una relación no lineal entre las fuerzas aplicadas y los desplazamientos. Los efectos no lineales pueden originarse a partir de la no linealidad geométrica como grandes deformaciones, la no linealidad del material (material elastoplástico) y el contacto. Estos efectos dan como resultado una matriz de rigidez que no es constante durante la aplicación de la carga. Esto se opone al análisis estático lineal, donde la matriz de rigidez se mantiene constante [20].

2.3.1. No linealidad geométrica.

La no linealidad geométrica ocurre siempre que la magnitud de los desplazamientos afecta la respuesta de la estructura producto de grandes desviaciones o rotaciones esfuerzos iniciales o rigidización por carga, generalmente ocurre cuando existen

pretensiones o elementos ya deformados por cargas o condiciones estructurales preexistentes, en la figura 2.1 se aprecia la curva de carga vs deflexión de un material previamente deformado, que tiene diferentes condiciones de rigidez conforme se le aplica una carga o presión externa [21].

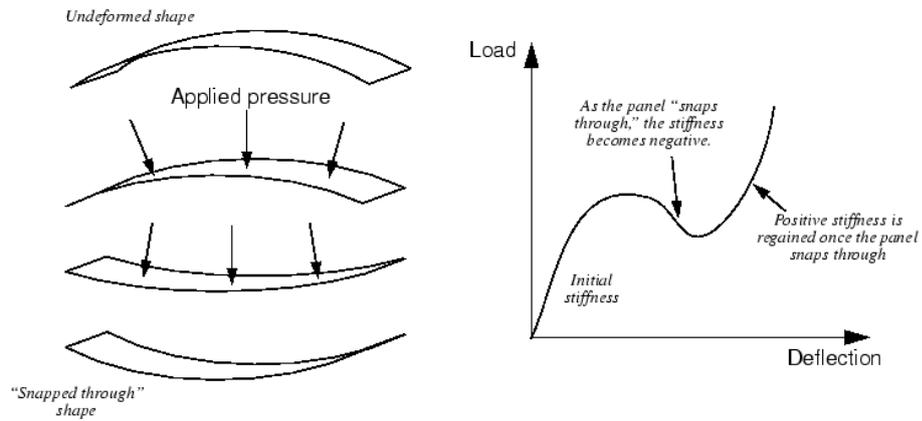


Figura 2- 1. Representación gráfica de la no linealidad geométrica de un material[21].

2.3.2. No linealidad de material.

La no linealidad del material implica el comportamiento no lineal de un material basado en la deformación actual, el historial de deformación, la tasa de deformación, la temperatura, la presión, entre otros factores, los materiales no lineales presentan características como elastoplasticidad e hiperelasticidad en la figura 2-2 se muestra la curva de esfuerzo deformación de un material no lineal, se observa que conforme el esfuerzo sube la curva tiene diferente comportamiento hasta llegar al punto de fluencia y fractura.[21]

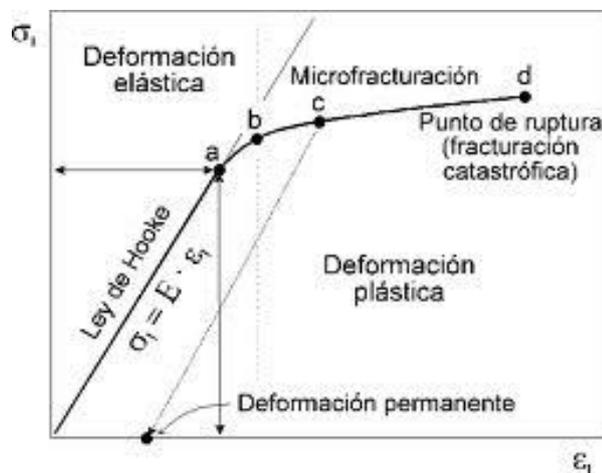


Figura 2- 2.Diagrama esfuerzo deformación de un material no lineal [21].

2.4. Análisis por elementos finitos para juntas de bridas apernadas.

Para conocer el efecto que tiene una carga externa creciente en la brida apernada es necesario aplicar, la carga total del perno y la precarga de compresión entre las secciones de acero. Para obtener los mejores resultados y modelar este comportamiento, es necesario aumentar la carga externa en función del tiempo [22]. La evaluación de esta carga dependiente del tiempo requiere un modelamiento **transitorio** y un método **implícito** de análisis. Los modelos explícitos están concebidos para adaptarse a grandes cambios en la rigidez del modelo, como el cambio en la rigidez que sigue a la separación de la unión atornillada [22].

2.5. Método explícito e implícito

El método de elementos finitos explícito se utiliza para calcular el estado de un sistema determinado en un momento diferente al actual. Por el contrario de un análisis implícito que encuentra una solución resolviendo una ecuación que incluye tanto el estado actual como el posterior del sistema dado[23]. En los casos donde se utiliza el modelo explícito los modelos de materiales no solo deben tener en cuenta la variación de la tensión con la deformación, sino también la tasa de deformación. En esta escala, las velocidades de deformación juegan un papel particularmente importante[24]. En la figura 2-3 se muestran los casos que se podrían modelar usando ambos métodos, para el caso de esta investigación se utilizó el método explícito ya que es necesario conocer las deformaciones y el daño de la junta de brida apernada

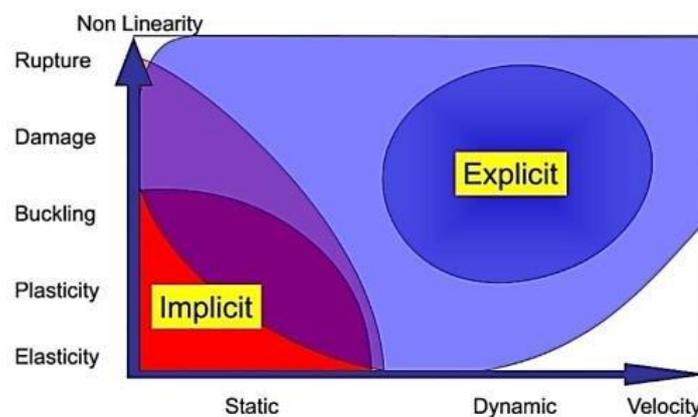


Figura 2- 3. Diferencias entre el método implícito y explícito relacionado con la no linealidad y el comportamiento del sistema, sea estático o dinámico [24].

2.6. Modelamiento de contacto entre cuerpos en el método de elementos finitos.

Para el análisis de las bridas apernadas se utilizaron los contactos del tipo bonded y Frictionless detallados a continuación:

2.6.1. Contacto tipo bonded.

Esta es la configuración predeterminada en los softwares de elementos finitos y se aplica a todas las regiones de contacto sean superficies, sólidos, líneas, caras, bordes. Las regiones de contacto están unidas, no se permite el deslizamiento ni la separación entre caras o bordes se modela como que las dos geometrías están pegadas entre sí. Este tipo de contacto permite una solución lineal ya que la longitud/área de contacto no cambiará durante la aplicación de la carga.[25]

2.6.2. Contacto tipo sin fricción (Frictionless).

Esta configuración modela el contacto unilateral estándar; es decir, la presión normal es igual a cero si se produce la separación. Por lo tanto, se pueden formar espacios en el modelo entre cuerpos dependiendo de la carga. Presenta una solución no lineal porque el área de contacto puede cambiar a medida que se aplica la carga. Se supone un coeficiente de fricción cero, lo que permite el deslizamiento libre. El modelo debe estar bien restringido al usar esta configuración de contacto. Se agregan resortes débiles al ensamblaje para ayudar a estabilizar el modelo a fin de lograr una solución razonable[25]. Como se muestra en la figura 2-4 este tipo de contacto puede ser utilizado para cargas normales y tangenciales, esta última corresponde al modelo planteado. En la tabla 2-1 se presentan las características de este tipo de contacto.

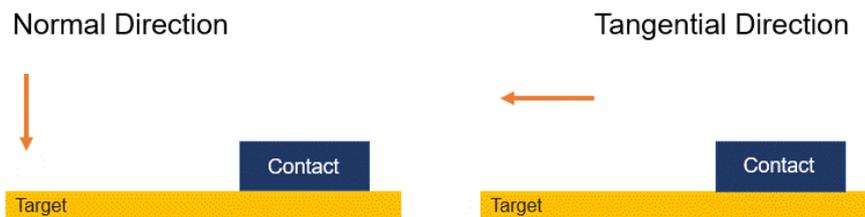


Figura 2- 4. Dos Cuerpos en contacto pueden presentar diferente comportamiento que se relaciona con la fricción y la rugosidad [26].

Tabla 2- 1. Comportamiento de los contactos bonded y Frictionless empleados en el modelo matemático de elementos finitos; μ : rugosidad [27].

Tipo de contacto	Brecha abierta o cerrada	Permite el deslizamiento
Bonded	No	No
Frictionless	Si	Si, $\mu=0$

2.6.3. Brida apernada.

Una junta apernada de brida es uno de los nodos básicos usados en uniones de sistemas de tuberías, y conexiones estructurales de elementos de sección hueca que permite la conexión de segmentos independientes en secciones más complejas o la unión de dispositivos y máquinas de medición y procesamiento industriales y accesorios hidráulicos, este tipo de juntas se emplean también en ingeniería estructural en construcciones esbeltas como los monopolos de telecomunicaciones, en la figura 2-5 se presentan las diferentes partes de este tipo de conexión[28].

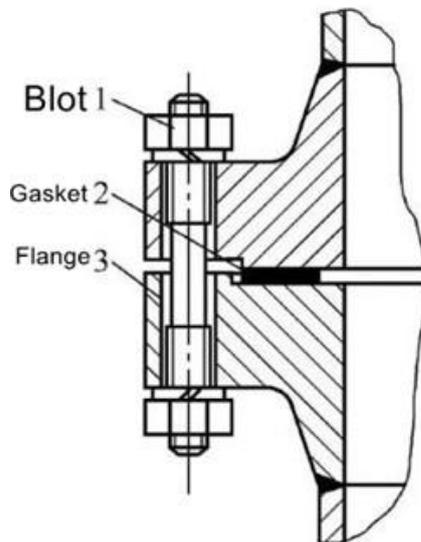


Figura 2- 5. Conexión de brida apernada y sus componentes en la unión de dos elementos estructurales [28].

2.7. Monopolos.

Es un tipo de estructura que consiste en un tallo o un poste anclado al suelo. Según su sección transversal, según la referencia [3] se divide en dos tipos:

De poste circular: es un tipo de monopolo que tiene una sección transversal/diámetro de panel similar de abajo hacia arriba.

De poste cónico: es un tipo de monopolo que tiene un tamaño de diámetro de sección transversal variado que, cuando el diámetro utilizado es más alto, será más pequeño.

Generalmente los monopolos se componen de secciones poligonales montadas entre sí mediante juntas de bridas apernadas, se usan rigidizadores o cartelas para mejorar la resistencia de las juntas y garantizar la estabilidad del conjunto, este tipo de estructuras son utilizadas en torres de transmisión eléctrica como se muestra en la figura 2-6 y para soportar equipos de telecomunicaciones..



Figura 2- 6. Monopolo de sección poligonal unido mediante bridas apernadas [29].

2.8. Juntas soldadas utilizadas en la construcción de monopolos de telecomunicaciones.

Los miembros poligonales se conforman por dos semi secciones unidas entre sí por juntas de penetración completa (CJP), mientras que las bridas se unen por juntas de penetración parcial (PJP) [30].

2.9. Junta de penetración completa (CJP)

La junta CJP (Figura 2-7) es una soldadura de ranura que se extiende completamente a través del espesor de los componentes unidos. El propósito principal del uso de las soldaduras de ranura CJP es transmitir la capacidad de carga completa de los componentes estructurales que unen [31].



Figura 2- 7. Junta de penetración completa (CJP) [32].

2.10. Junta de penetración parcial (PJP).

La soldadura PJP (Figura 2-8) es una soldadura en la que el metal de soldadura no alcanza el espesor total del material base que se está soldando, sino que se extiende solo a través de una parte de él [31]



Figura 2- 8. Junta de penetración parcial (PJP) [32].Figura 2- 9

2.11. Ensayo de carga lateral.

Consiste en aplicar cargas puntuales a una determinada estructura hasta que llegue a fallar, para ello se emplea un sistema de aplicación de carga compuesto por un cilindro hidráulico y una celda de carga, el prototipo se ensambla sobre una losa de reacción mediante pernos de anclaje, mientras que el sistema de aplicación de carga se arma en un muro de reacción, lo suficientemente fuerte para evitar cualquier desplazamiento que afecte al ensayo, en la figura 2-10 se muestra el prototipo utilizado para esta investigación ensamblado para el ensayo de carga lateral montónico [33].



Figura 2- 10. Ensayo de carga lateral con muro y losa de reacción en una estructura metálica Normas aplicadas en el ensayo de carga lateral del monopolo de telecomunicaciones [34].

La norma ASTM E564-06 describe métodos para evaluar la capacidad de corte en estructuras de acero y mampostería confinada por ensayo de carga lateral aquí se menciona las condiciones de apoyo de los especímenes de prueba a una losa y muro de reacción y el equipamiento necesario, las cargas aplicadas a la estructura se especifican en la norma TIA 222G e incluyen las combinaciones específicas para cargas muertas vivas, temporales, de viento, hielo y granizo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación

El desarrollo del informe, las etapas de la investigación bibliográfica y descriptiva, y el modelo de elementos finitos fueron desarrollados en la ciudad de Ambato, mientras que la fase experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito, mismo que cuenta con un muro y losa de reacción para sujetar los especímenes de prueba y los equipos necesarios para la aplicación de las cargas y la medición de fuerzas y desplazamientos. Este establecimiento fue fundado en el año 2002 y desde entonces brinda los servicios al medio externo en investigaciones relacionadas con el sector de la construcción tanto en hormigón como en acero.

3.2. Equipos usados en el ensayo de carga lateral monotónica

3.2.1. Muro y losa de reacción

El ensayo de carga lateral monotónica fue ejecutado en el Centro de Investigación de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional EPN, el centro cuenta con un muro y losa de reacción capaz de brindar un soporte indeformable a los especímenes ensayados, la carga es aplicada por un cilindro hidráulico de 100 kN y los resultados se obtienen por medio de sensores de carga y desplazamiento con una precisión entre 0,1 y 0,5 %

3.2.2. Celda de carga:

Consiste en un dispositivo para medir con exactitud la carga aplicada, el sensor empleado en esta fase tiene una capacidad de 20 toneladas y se acopla con una articulación al espécimen de prueba.



Figura 3- 1. Acople de la celda de carga entre el cilindro y la parte superior del espécimen de prueba [34].

3.2.3. Cilindro hidráulico hueco

Este equipo fue utilizado en la aplicación de una presión de 4000 psi [34] en los pernos longitudinales que atravesaron la viga de cimentación y la losa de reacción como se muestra en la FIGURA 3-4, esto se realiza para evitar los desplazamientos innecesarios que afectan la calidad del ensayo. La presión se aplicó en la parte inferior de la losa de reacción en la placa de apoyo del perno y fue medida desde la bomba manual con un barómetro.



Figura 3- 2. Cilindro hidráulico hueco en la aplicación de la presión para el perno en la losa de reacción [34].

3.2.4. Sensores LVDT.

Son dispositivos electromecánicos utilizados para convertir el movimiento mecánico o las vibraciones, concretamente el movimiento rectilíneo, en una corriente eléctrica variable, tensión o señales eléctricas. Es un mecanismo de accionamiento utilizado principalmente para sistemas de control automático o como sensores de movimiento mecánico en tecnologías de medición. En la fase experimental fue necesario para adquirir los datos de desplazamiento en los diferentes puntos de interés definidos en el modelo de elementos finitos en ambos prototipos.



Figura 3- 3. Sensor LVDT para la medición del desplazamiento vertical de la placa base [34].

3.2.5. Cilindro hidráulico 100 Ton:

Este equipo se une con el muro de reacción mediante una articulación, se empleó para la aplicación de la carga lateral monotónica en la parte superior de ambos prototipos, a través de una segunda articulación unida a una placa horizontal mediante 4 pernos de gran capacidad.

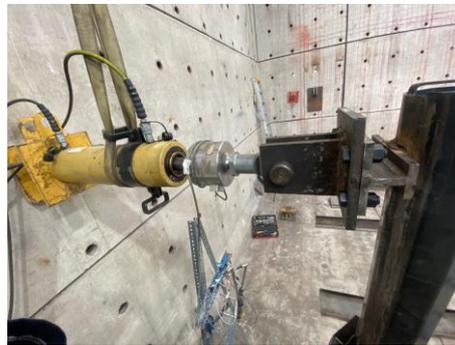


Figura 3- 4. Cilindro hidráulico de 100 Ton anclado al muro de reacción [34].

3.3. Equipos utilizados en la construcción de los especímenes de prueba.

Tabla 3- 1. Espesores de Plancha de acero ASTM A36 para cada parte de los especímenes de prueba.

Equipo	
<p>Dobladora hidráulica</p>  <p>Obtención de las semisecciones octogonales</p>	<p>Hormigonera</p>  <p>Preparación del hormigón f'c 300</p>
<p>Cortadora de plasma</p>  <p>Corte de bridas</p>	<p>Taladro de pedestal</p>  <p>Perforación de agujeros de las bridas</p>
<p>Soldadora</p>  <p>Soldadura de los componentes del monopolo, superior e inferior</p>	<p>Torno</p>  <p>Rectificación de bridas y centrado de agujeros</p>
<p>Amoladora</p>  <p>Rectificado de caras, esquinas, remoción de rebaba y preparación de juntas soldadas</p>	<p>Torquímetro</p>  <p>Ajuste de pernos de las bridas</p>

3.4. Materiales.

3.4.1. Acero ASTM A36

Para la fabricación de los especímenes de prueba a escala se empleó este tipo de acero, que es el material más común para la fabricación de este tipo de estructuras, el material para la construcción de especímenes de prueba se consiguió en forma de plancha según las partes del monopolo usándose los espesores descritos en la TABLA 3.1.

Tabla 3- 2. Espesores de Plancha de acero ASTM A36 para cada parte de los especímenes de prueba.

Espesor de plancha	Aplicación
5 mm	Semisecciones octogonales
6 mm	Bridas intermedias y cartelas
10 mm	Placas base.

3.4.2. Modelo de material para el acero ASTM A36.

Para el acero A36 del cual se compone el cuerpo del monopolo y las bridas se utilizó un modelo de endurecimiento isotrópico, en este método de modelamiento del material la superficie de fluencia permanece centrada alrededor de su línea central ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) en el espacio de tensiones y se expande o encoge de tamaño a medida que se desarrolla la deformación plástica, las propiedades generales del material en mención se presentan en la tabla 3-2.

Tabla 3- 3. Propiedades del acero ASTM A36 [35].

Material	Módulo de elasticidad	Relación de Poisson	Límite de Fluencia [Sy]	Resistencia Máxima a la tracción [Sut]
Plancha de acero ASTM A 36	200 GPa	0.26	250 MPa	400-550 MPa

Para obtener el modelamiento más adecuado se ingresaron datos de deformación plástica con su respectivo esfuerzo, de este modo se obtiene la curva propia del acero ASTM A36 con un comportamiento no lineal presentada en la figura 3-1[35].

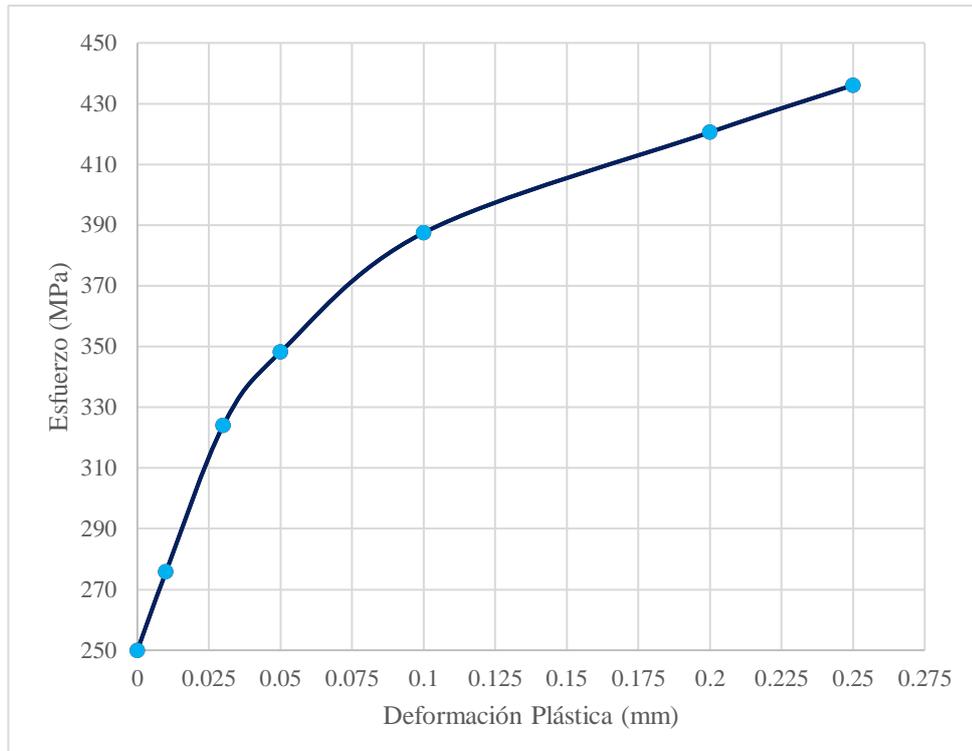


Figura 3- 5. Curva de esfuerzo deformación del acero ASTM A36 no lineal [35].

3.4.3. Pernos estructurales galvanizados.

Se emplearon pernos A325 para la unión de la junta apernada para mantener las condiciones más cercanas posibles a la realidad, se aplica una precarga de 54 kN

En la TABLA 3-3 se describen las propiedades físicas y mecánicas de los pernos utilizados en la fabricación de los especímenes de prueba

Tabla 3- 4. Propiedades de los pernos ASTM A 325.

Material	Módulo de elasticidad	Relación de Poisson	Límite de Fluencia [Sy]	Resistencia Máxima a la tracción [Sut]
Pernos estructurales ASTM A 325	210 GPa	0.27	660 MPa	830 MPa

Los pernos usados en la brida apernada deben ser pretensados para garantizar la unión perfecta de las bridas, en la figura 3-6 se muestra la curva de tensión de pernos de alta resistencia de la guía 17 de la AISC, donde se especifica que la pretensión mínima es de aproximadamente 40 kip y se relaciona con el número de giros de la tuerca, en este caso se utilizó una llave de torque calibrada para dar el apriete necesario en el montaje del monopolo de brida apernada

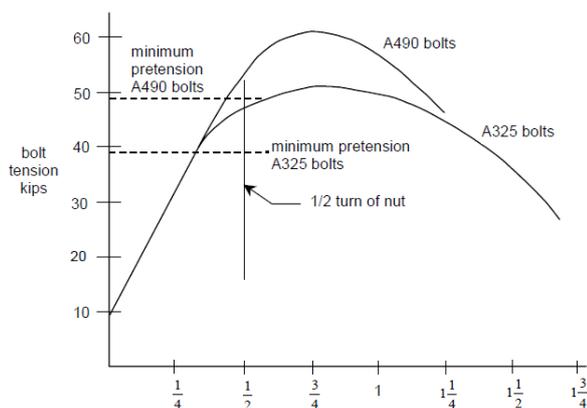


Figura 3- 6. Pretensión de los pernos ASTM A325.

3.4.4. Modelo de material para los pernos estructurales galvanizados ASTM A325.

Se utilizó un modelo bilineal que consta de una curva de dos pendientes, este modelo es adecuado para para simular el comportamiento estructural de elementos con un nivel de deformación relativamente bajo (5-10%), en este caso los pernos no se deforman significativamente como la brida del monopolo, por esto es adecuado este tipo de modelamiento de material.

En el modelo de endurecimiento isótropo bilineal, tanto la tensión como la deformación cambian incluso después de alcanzar la máxima deformación plástica. Pero el cambio de forma no puede observarse claramente. Los datos de entrada para este modelo son el límite elástico y el módulo tangente de la curva tensión-deformación del material.

Para el modelo de elementos finitos utilizado en esta investigación se utilizaron datos de la curva bilineal propios del material de los pernos de alta resistencia mostrados en la TABLA 3-4. En este modelo es necesario ingresar un módulo tangente que es propio del material la curva bilineal del material se presenta en la figura 3-7.

Tabla 3- 5. Propiedades de la curva bilineal del material de los pernos ASTM A325 estructurales [16].

Módulo de elasticidad E (GPa)	Coefficiente de Poisson	Esfuerzo de fluencia σ_y	Módulo tangente (MPa)
210	0.29	660	1630

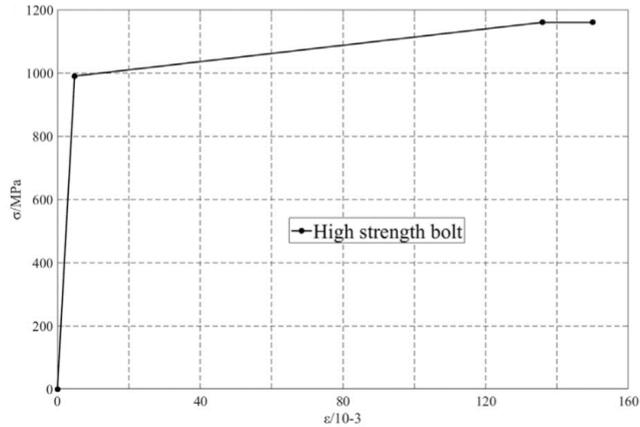


Figura 3- 7. Modelo bilineal para los pernos ASTM A325 [16].

3.4.5. Cálculo de los pernos según ASCE 48

Los pernos se dimensionan de forma que la suma de los esfuerzos de tracción causados por la carga externa aplicada y cualquier esfuerzo de tracción resultante no exceda el esfuerzo de tracción permitido, F_t , según se indica a continuación:

$$\frac{T_s}{A_s} = F_t$$

$$F_t = 0,75F_u$$

Área de esfuerzo.

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d - 0.9743p)^2$$

Donde

A_s :Área útil

d : Diámetro del perno

p : Paso de rosca del perno

T_s : Fuerza de tracción del perno

F_u : Resistencia última a la tracción del perno

Los pernos que se utilizarán son de la serie ASTM A325 y tienen un diámetro de 12,7 mm y un paso de rosca de 1,75 mm.

$$A_s = \frac{\pi}{4} (12,7 \text{ mm} - 0.9743(1,75 \text{ mm}))^2$$

$$A_s = 94,95 \text{ mm}^2$$

$$F_t = 0,75(825 \text{ MPa})$$

$$Ft = 618,75$$

Se considera la pretensión del perno de 58 kN

$$\frac{58 \times 10^3 N}{94,95 \text{ mm}^2} = 618,75 \text{ MPa}$$

610,84 MPa menor a 618,75 MPa

La relación carga sobre área no supera el esfuerzo admisible de los pernos por ende el diseño es correcto y el perno trabajaría adecuadamente a tracción.

3.4.6. Proceso de soldadura

En la construcción de los prototipos de monopolo de telecomunicaciones se empleó el proceso de soldadura FCAW e requirieron gases y materiales de aporte específicos detallados en el WPS y PQR presentados en los Anexos 3 y 4

3.5. Cimentación.

3.5.1. Varilla micro aleada NTE-INEN 2167.

Para armar la viga de cimentación se utilizó varilla corrugada longitudinal de 18 mm, y de 14 mm en los estribos, para los pernos de anclaje el diámetro fue de 16 para facilitar la fabricación de una rosca de 5/8 la cual se sirve para sujetar la placa base y la brida inferior del prototipo.



Figura 3- 8. Montaje de hierros de la cimentación de hormigón armado [Autor]

3.5.2. Placa de anclaje circular espesor 12 mm

Para guiar los pernos de anclaje se utilizó una placa de acero que fue fabricada en base al diseño presentado en el Anexo 2 (Plano de viga de cimentación), de este modo se garantizó un acople perfecto entre la parte inferior del monopolo y el hormigón.

3.5.3. Hormigón

El hormigón usado en la cimentación tiene una resistencia a la compresión $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ la dosificación de componentes utilizados para obtener estas características se empleó la dosificación descrita en la tabla 3-5.

Tabla 3- 6. Dosificación de componentes para el hormigón $f'c = 300$ [37].

Resistencia	Cemento	Ripio	Ripio	Agua
300 kg/cm^2	1 quintal	1,8 Parihuelas	3,9 Parihuelas	24 litros

En la tabla 3-6 se presentan las propiedades del hormigón utilizado para la cimentación que deben ser las adecuadas para lograr un soporte que minimice las deformaciones que pueden afectar la calidad del ensayo de carga lateral, las propiedades del hormigón usado en la cimentación se presentan en la tabla 3-7.

Tabla 3- 7. Propiedades del hormigón $f'c = 300$ [37].

Resistencia	Relación de Poisson	Resistencia a la compresión	Falla ante la deformación plástica
300 kg/cm^2	0,18	300 kg/cm^2	0,004

3.6. Tipo de investigación

Bibliográfica: Se emplearon artículos científicos, libros y guías para determinar la metodología que debe seguirse para la elaboración del modelo discretizado de elementos finitos.

Descriptiva: Se realizó una descripción detallada del comportamiento de las juntas de brida apertada bajo las condiciones de carga típicas de las estructuras de telecomunicaciones.

Experimental: Se validaron las condiciones simuladas mediante ensayos físicos con prototipos a escala.

Cuantitativa: Se analizaron las variables del comportamiento del monopolo mediante datos numéricos. Identificación de especímenes de prueba y modelos de simulación. Métodos.

3.7. Hipótesis

El nivel de carga aplicado dará como resultado la deflexión de la estructura y por lo tanto la deformación de las vigas.

3.7.1. Variable dependiente.

Deflexión del prototipo y deformación de las bridas apernadas.

3.7.2. Variable Independiente.

Carga lateral monotónica en ensayo físico y por el modelo de elementos finitos.

3.7.3. Operacionalización de variables.

Tabla 3- 8. Operacionalización de variables variable dependiente.

Variable dependiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos
Se verificará la deflexión del prototipo sometido a carga lateral y las deformaciones de las bridas apernadas.	Deformación máxima	Mediciones con sensor LVDT	Deformaciones máximas y locales Límite de fluencia	<ul style="list-style-type: none"> - Experimentación - Hojas de registros de datos - Hoja de cálculo - Sistema de Adquisición de datos. - Software MEF
		Deformación máxima obtenida por MEF		
	Carga Lateral	Fuerza medida con celda de carga de 20 Ton	Intervalos de carga de 2 kN	<ul style="list-style-type: none"> - Observación con sensores - Sistema de adquisición de datos - Hojas de registros de datos
Carga aplicada en modelo MEF				

3.7.4. Variable independiente

Tabla 3- 9. Operacionalización de la variable independiente

Variable dependiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos
Aplicación de una carga lateral monotónica en ensayo físico y por el modelo de elementos finitos.	Carga y condiciones de frontera MEF	Intervalos de carga medidos por MEF	Deformaciones máximas y locales Límite de fluencia Esfuerzos	<ul style="list-style-type: none"> - Experimentación - Hojas de registros de datos - Hoja de cálculo - Software MEF
		Deformación máxima obtenida por MEF		
	Carga Lateral y condiciones de ensayo físico	Fuerza medida con celda de carga de 20 Ton	Intervalos de carga de 2 kN Condiciones de sujeción propias del ensayo.	<ul style="list-style-type: none"> - Observación con sensores - Sistema de adquisición de datos - Hojas de registros de datos
Condiciones de carga, sujeción y medición de resultados				

3.7.5. Población o muestra:

Se estableció una muestra de dos ensayos del mismo tipo con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y validar la metodología de diseño aplicada tanto en el modelo de elementos finitos como en el modelo a escala teniendo en cuenta los requerimientos de la norma FEMA-350/junio 2020 .

3.7.6. Recolección de información:

Para la recolección de información se emplearon las siguientes técnicas:

Documental: Se recopiló información sobre el estado del arte del tema de investigación y condiciones de simulación y ensayo

Fichaje: Se emplearon fichas de recolección de datos, en donde se colocaron imágenes y los resultados más importantes de las simulaciones y de los ensayos de carga lateral monotónica, se registraron las deformaciones para cada intervalo de carga hasta la falla de los especímenes.

Fotografía: Del mismo modo, se colocaron fotografías con los resultados de los ensayos físicos y su comparativa con las simulaciones.

3.8. Partes del monopolo

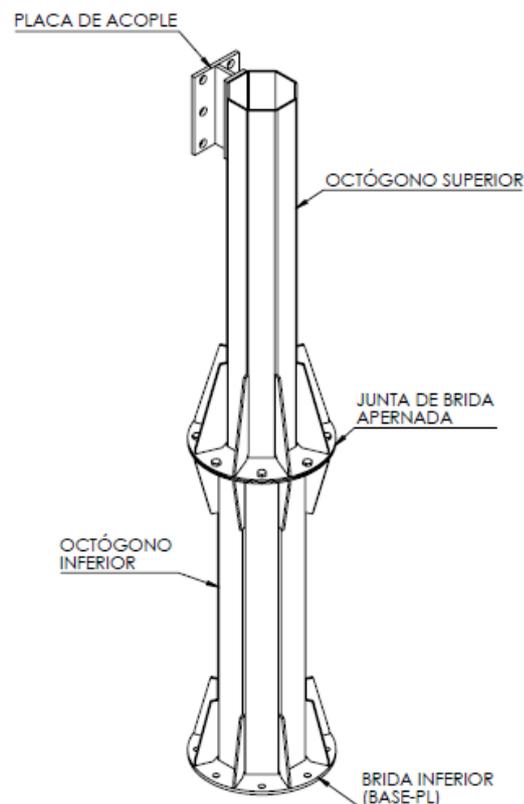


Figura 3- 9. Partes del monopolo [Autor]

El monopolo consta de las partes descritas en la figura 3-7 donde se señalan las de mayor interés que se tomaron en cuenta en el ensayo de carga lateral, y en los modelos de elementos finitos.

3.9. Partes de la junta de brida apernada

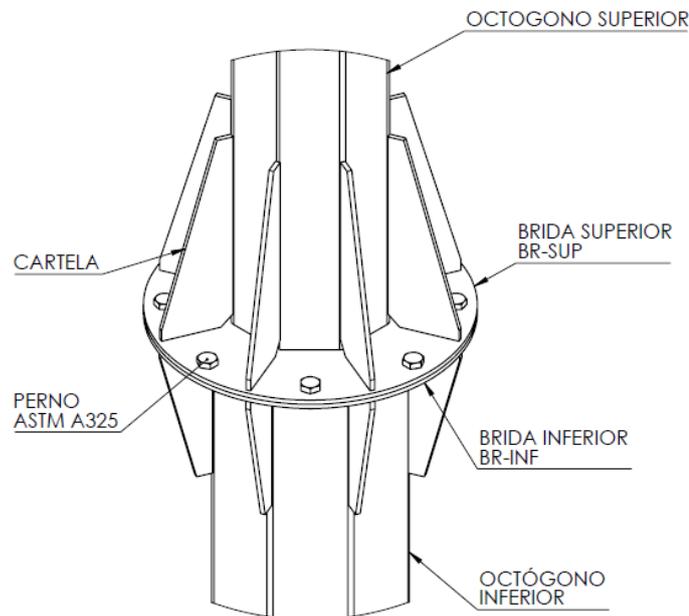


Figura 3- 10. Partes de la junta de brida apernada [Autor]

El estudio se enfocará en la junta de brida apernada del monopolo, cuyas partes principales se muestran en la figura 3-8 se espera obtener los resultados en las bridas superior (BR-SUP) e inferior (BR-INF) con los modelos de elementos finitos 01-MNP-MEF (completo) y 02-MNP-MEF (simplificado) y los dos especímenes que fueron evaluados experimentalmente.

3.10. Instrumentación

Antes de aplicar la carga fue necesario identificar los puntos de interés en donde se ubicaron los sensores LVDT para medir el desplazamiento, estos puntos se seleccionaron en base al análisis MEF en donde se identificaron las zonas críticas en las que se presentan las deformaciones máximas, en las figuras 3-9 y 3-10 se muestra detalladamente los puntos donde se colocaron los sensores para obtener los datos de desplazamiento.

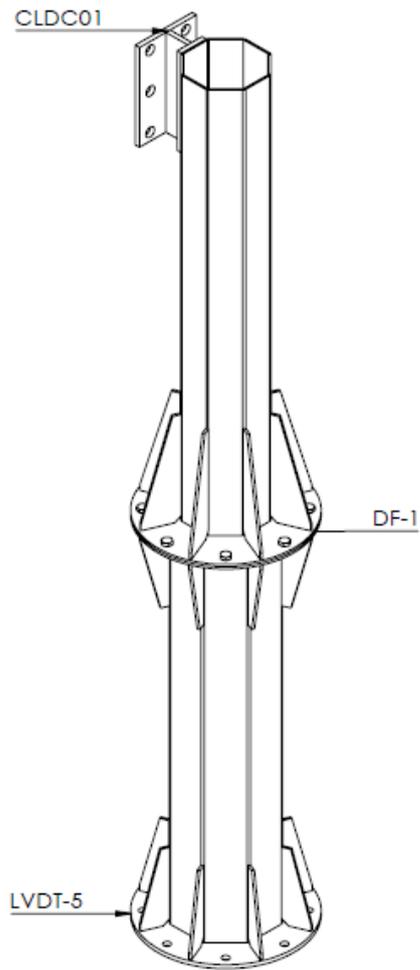


Figura 3- 11. Puntos de medición de deformaciones generales en el monopolo con sensores LVDT.

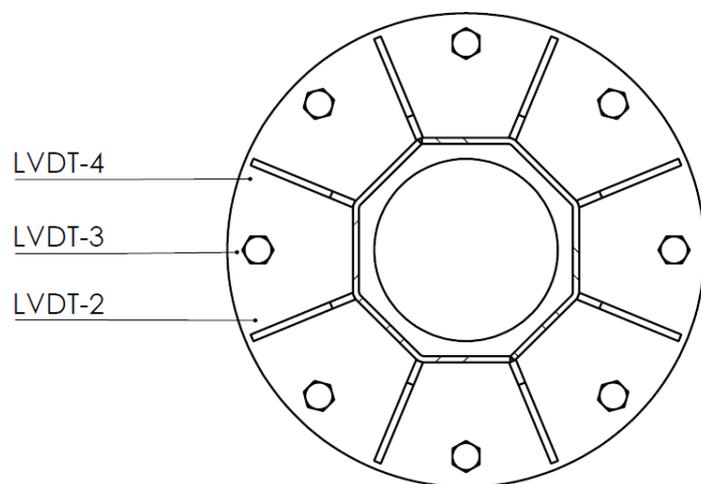


Figura 3- 12. Puntos de medición de deformaciones en la junta de brida apornada con sensores LVDT.

En la figura 3-9 se muestra la ubicación de los sensores LVDT 2,3 y 4 usados para la adquisición de datos de desplazamientos localizados de la brida apernada, dichos desplazamientos se relacionan con la fuerza adquirida con la celda de carga para conocer el comportamiento de la junta de brida apernada.

3.10.1. Procesamiento de la información.

Las deformaciones obtenidas fueron tabuladas para cada intervalo de carga, de este modo se obtuvieron las curvas de fuerza-deformación de los prototipos ensayados y del modelo de elementos finitos, para validar el modelo matemático propuesto las curvas de la simulación y de los ensayos tendrían un comportamiento similar con un margen de error aceptable el proceso se muestra a detalle en el flujograma de la figura 15, la denominación de cada modelo de elementos finitos y espécimen de prueba se muestra en la tabla 3-7..

Tabla 3- 10. Identificación de los modelos de elementos finitos y especímenes de prueba.

Espécimen/Modelo.	Descripción.	Carga aplicada.
01-MNP-MEF	Modelo MEF Monopolo de telecomunicaciones según Anexo 1.	Lateral Monotónica (simulada) en intervalos de 2 kN hasta la falla.
02-MNP-MEF	Modelo MEF Monopolo de telecomunicaciones simplificado.	Lateral Monotónica (simulada) en intervalos de 2 kN hasta la falla.
01-OCT5-BR6	Espécimen de prueba 1 según anexo 1.	Lateral Monotónica con cilindro hidráulico en intervalos de 2 kN hasta la falla.
02-OCT5-BR6	Espécimen de prueba 2 según anexo 1.	Lateral Monotónica con cilindro hidráulico en intervalos de 2 kN hasta la falla.

3.10.2. Variables respuesta o resultados esperados.

Las variables respuesta obtenidas son la deflexión total y la deformación de las bridas en el modelo de elementos finitos y en el ensayo físico, para llegar estos resultados se siguieron los procedimientos descritos en las tablas y . Los resultados se obtuvieron mediante la adquisición de datos de sensores de carga y deformación en los especímenes de prueba y con las funciones del software de elementos finitos en los modelos MEF.

Resultados obtenidos con el método de elementos finitos

Tabla 3- 11. Resultados obtenidos con el método de elementos finitos.

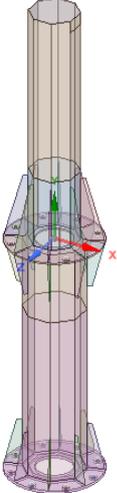
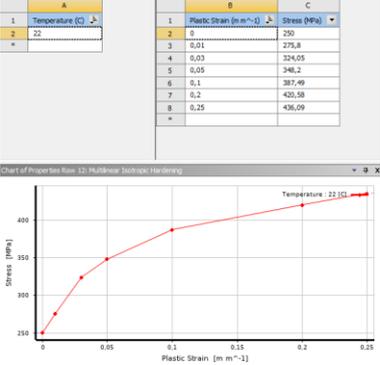
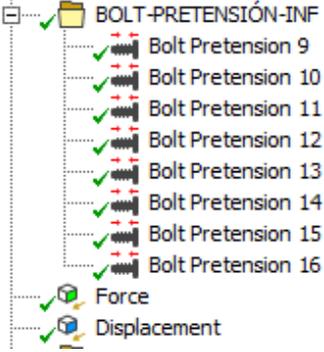
Paso	Descripción																
<p>1. Preparación de la geometría en superficies con elemento tipo shell</p> 	<p>Modelamiento de los octógonos y bridas en superficies para simplificar el mallado y asignar espesores.</p>																
<p>2. Modelamiento del material no lineal.</p>  <table border="1" data-bbox="443 1055 823 1182"> <thead> <tr> <th>Plastic Strain (m m⁻³)</th> <th>Stress (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>250</td></tr> <tr><td>0,01</td><td>275,8</td></tr> <tr><td>0,03</td><td>324,05</td></tr> <tr><td>0,05</td><td>340,2</td></tr> <tr><td>0,1</td><td>367,49</td></tr> <tr><td>0,2</td><td>420,58</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>436,09</td></tr> </tbody> </table>	Plastic Strain (m m ⁻³)	Stress (MPa)	0	250	0,01	275,8	0,03	324,05	0,05	340,2	0,1	367,49	0,2	420,58	0,25	436,09	<p>Ingreso de los datos del material en el modelo de endurecimiento isotrópico multilíneal en base a la figura</p>
Plastic Strain (m m ⁻³)	Stress (MPa)																
0	250																
0,01	275,8																
0,03	324,05																
0,05	340,2																
0,1	367,49																
0,2	420,58																
0,25	436,09																
<p>3. Condiciones de frontera</p>  <ul style="list-style-type: none"> ✓ BOLT-PRETENSIÓN-INF <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bolt Pretension 9 ✓ Bolt Pretension 10 ✓ Bolt Pretension 11 ✓ Bolt Pretension 12 ✓ Bolt Pretension 13 ✓ Bolt Pretension 14 ✓ Bolt Pretension 15 ✓ Bolt Pretension 16 ✓ Force ✓ Displacement 	<ul style="list-style-type: none"> - Apoyos fijos en la placa base - Pretensión de pernos en las bridas 																

Tabla 3-11. Resultados obtenidos con el método de elementos finitos.

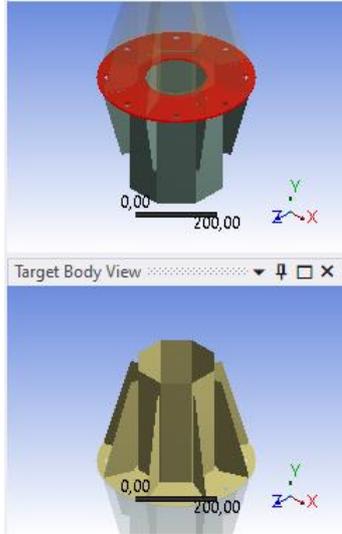
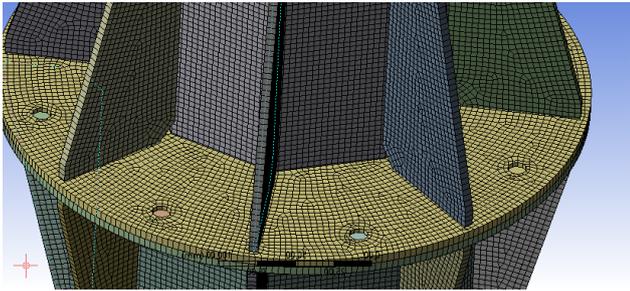
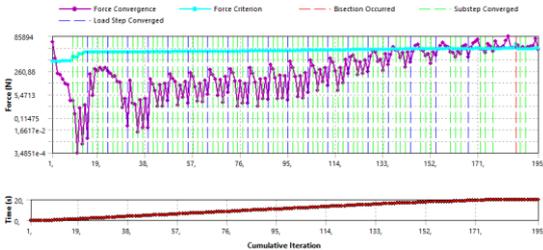
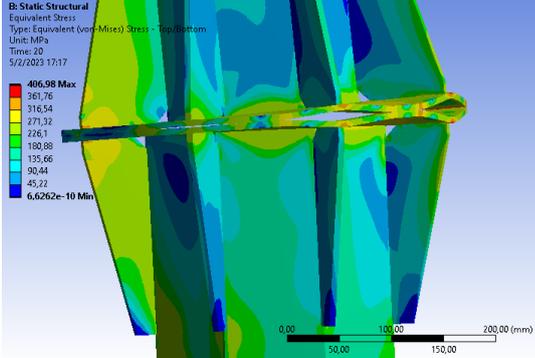
Paso	Descripción																														
<p>4. Modelamiento de contacto entre elementos (Bridas)</p> 	<p>Contactos de tipo sin fricción que permiten desplazamiento entre las bridas del octógono superior, inferior y la placa base.</p>																														
<p>5. Aplicación de cargas por intervalos</p>  <table border="1" data-bbox="746 1055 842 1155"> <thead> <tr> <th>Steps</th> <th>Time (s)</th> <th>Load (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td>-2000</td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td>-4000</td></tr> <tr><td>5</td><td>4</td><td>-6000</td></tr> <tr><td>6</td><td>4</td><td>-8000</td></tr> <tr><td>7</td><td>6</td><td>-10000</td></tr> <tr><td>8</td><td>6</td><td>-12000</td></tr> <tr><td>9</td><td>8</td><td>-14000</td></tr> </tbody> </table>	Steps	Time (s)	Load (N)	1	1	0	2	1	0	3	2	-2000	4	2	-4000	5	4	-6000	6	4	-8000	7	6	-10000	8	6	-12000	9	8	-14000	<p>20 Intervalos de carga de 2 kN</p>
Steps	Time (s)	Load (N)																													
1	1	0																													
2	1	0																													
3	2	-2000																													
4	2	-4000																													
5	4	-6000																													
6	4	-8000																													
7	6	-10000																													
8	6	-12000																													
9	8	-14000																													
<p>6. Mallado</p> 	<p>Elementos tipo shell</p>																														
<p>7. Postprocesado</p> 	<p>Solución por iteración directa con convergencia por el método de Newton Rhapson</p>																														

Tabla 3-11. Resultados obtenidos con el método de elementos finitos.

Paso	Descripción
<p style="text-align: center;">8. Solución</p> 	<p style="text-align: center;">Modelo MEF solucionado en el tiempo establecido</p>
<p style="text-align: center;">9. Obtención de resultados</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Deflexión total del modelo - Deformaciones locales de las bridas - Cargas aplicadas <p>Nota: Estos resultados se generan automáticamente en el software.</p>

3.10.2.1. Resultados obtenidos con los ensayos experimentales

En la tabla 3-9 se presenta el procedimiento realizado para la obtención de resultados mediante ensayos experimentales.

Tabla 3- 12. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.

Paso
<p style="text-align: center;">1. Corte del material de los especímenes de prueba</p> 

Tabla 3-12. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.

Paso
<p data-bbox="363 293 963 327">2. Doblez de semisecciones de los octógonos</p> 
<p data-bbox="363 792 807 826">3. Corte por plasma de las bridas</p> 
<p data-bbox="363 1330 1034 1364">4. Rectificado de bordes y perforación de agujeros</p> 

Tabla 3-12. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.

Paso
5. Proceso de soldadura

6. Construcción de la viga de cimentación y placa base in situ

7. Fijación de la viga de cimentación a la losa de reacción

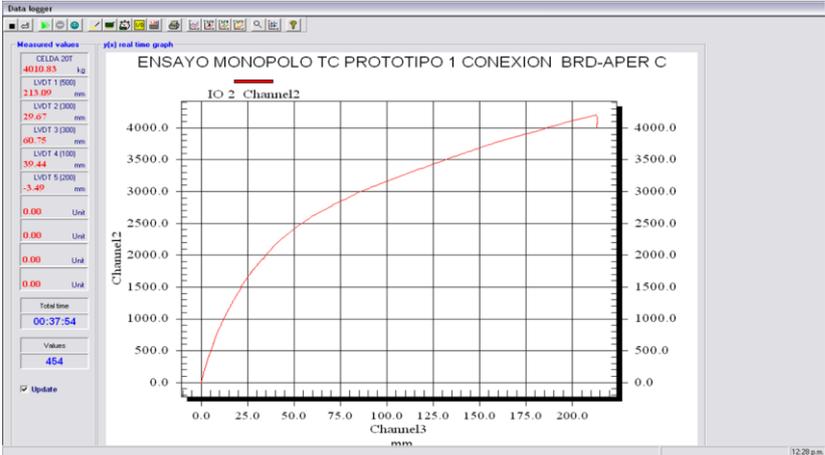

Tabla 3-12. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.

Paso
8. Montaje del octógono inferior

9. Montaje del octógono superior

10. Fijación del gato hidráulico en la parte superior


Tabla 3-12. Obtención de resultados con los ensayos experimentales.

Paso																																										
<p>11. Instrumentación</p> 																																										
<p>12. Ejecución del ensayo</p> 																																										
<p>13. Obtención de resultados</p>  <table border="1" data-bbox="448 1525 528 1921"> <thead> <tr> <th colspan="2">Measured values</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CELDA 201</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4010.83</td> <td>kg</td> </tr> <tr> <td>LVD1 1 (500)</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>213.095</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LVD1 2 (300)</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>29.67</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LVD1 3 (300)</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>60.74</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LVD1 4 (100)</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>39.44</td> <td></td> </tr> <tr> <td>LVD1 5 (200)</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>3.49</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>Unit</td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>Unit</td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>Unit</td> </tr> <tr> <td>0.00</td> <td>Unit</td> </tr> <tr> <td>Total time</td> <td></td> </tr> <tr> <td>00:37:54</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Values</td> <td></td> </tr> <tr> <td>454</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Measured values		CELDA 201		4010.83	kg	LVD1 1 (500)	mm	213.095		LVD1 2 (300)	mm	29.67		LVD1 3 (300)	mm	60.74		LVD1 4 (100)	mm	39.44		LVD1 5 (200)	mm	3.49		0.00	Unit	0.00	Unit	0.00	Unit	0.00	Unit	Total time		00:37:54		Values		454	
Measured values																																										
CELDA 201																																										
4010.83	kg																																									
LVD1 1 (500)	mm																																									
213.095																																										
LVD1 2 (300)	mm																																									
29.67																																										
LVD1 3 (300)	mm																																									
60.74																																										
LVD1 4 (100)	mm																																									
39.44																																										
LVD1 5 (200)	mm																																									
3.49																																										
0.00	Unit																																									
0.00	Unit																																									
0.00	Unit																																									
0.00	Unit																																									
Total time																																										
00:37:54																																										
Values																																										
454																																										

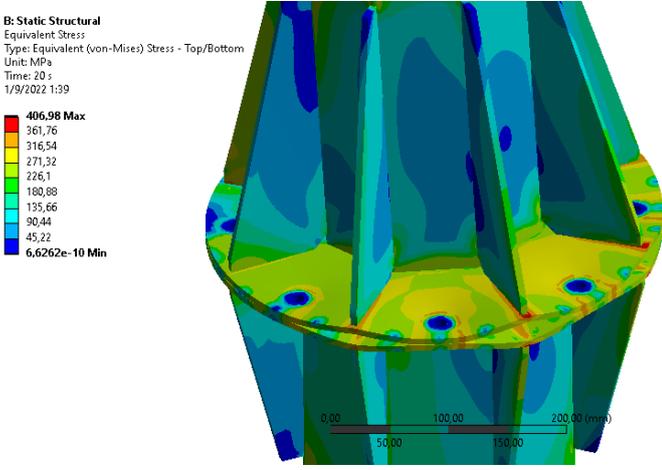
CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde la tabla 4-1 se presentan los resultados de los análisis por elementos finitos y obtenidos con los ensayos físicos de carga lateral monotónica.

4.1.1. Esfuerzo equivalente Von Mises modelo 01-MNP-MEF.

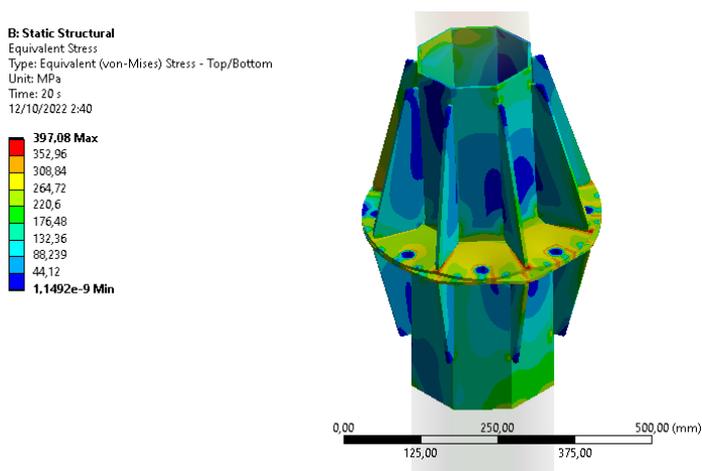
Tabla 4- 1. Esfuerzo equivalente Von Mises del prototipo de brida apernada por MEF.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de simulación	01-MNP-MEF		Espécimen	01-OCT5-BR6
Material	Bridas y octógono	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	N/A
Características de simulación	Carga aplicada	Cond. Frontera	Tipo de análisis	Tiempo de procesamiento
	Max: 38 kN Pret. Pernos: 53,38 kN	Desplazamientos Restringidos en la base	Estático no lineal	4 horas
Software utilizado	ANSYS Módulo Workbench			
N° de nodos	133346	Tipo de elemento	Shell 181 (superficie)	
N° de elementos	132455	Calidad de malla	0.99957	
Características del ordenador		AMD Ryzen 7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; 32 GB Ram; Tarjeta de video NVIDIA Geforce 8Gb		
Realizado por:	Ing. Danny Muyulema.	Revisado por:	Ing. Francisco Peña. M.Sc	
		Fecha:	01-09-2022	
RESULTADOS DE SIMULACIÓN				
Carga [N]	Esfuerzo [MPa]			
0	0			
2000	157,94			
4000	208,23			
6000	241,33			
8000	252,86			
10000	255,52			
12000	256,82			
14000	259,71			
16000	268,73			
18000	280,37			
20000	293,44			
22000	308,89			
24000	324,39			
26000	334,56			
28000	346,16			
30000	358,33			
32000	372,25			
34000	385,02			
36000	392,42			
38000	406,98			

Observaciones: Se presentan los resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises para cada intervalo de carga, se observa que el material supera el límite de fluencia a los 8 kN por concentración de esfuerzos que se da principalmente en la unión de las cartelas con la brida, que se identifica como la parte más crítica con un esfuerzo máximo de 406,98 MPa a los 38 kN.

4.1.2. Esfuerzo equivalente Von Mises modelo 02-MNP-MEF.

Tabla 4- 2. Esfuerzo equivalente Von Mises del prototipo de brida apernada por MEF (Modelo Simplificado).

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de simulación	02-MNP-MEF	Especimen		01-OCT5-BR6
Material	Bridas y octógono	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	N/A
Características de simulación	Carga aplicada	Cond. Frontera	Tipo de análisis	Tiempo de procesamiento
	Max: 38 kN Pret. Pernos: 53,38 kN	Apoyo fijo en el vértice inferior del elemento beam del octógono inferior.	Estático no lineal	1.5 horas
Software utilizado	ANSYS Módulo Workbench,			
N° de nodos	52973	Tipo de elemento	Shell 181 (superficie)	
N° de elementos	52254	Calidad de malla	0.99957	
Características del ordenador	AMD Ryzen 7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; 32 GB Ram; Tarjeta de video NVIDIA Geforce 8Gb			
Realizado por:	Ing. Danny Muyulema.	Revisado por:	Ing. Francisco Peña. M.Sc.	
		Fecha:	01-09-2022	
RESULTADOS DE SIMULACIÓN				
Carga [N]	Esfuerzo [MPa]	 <p>B: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: MPa Time: 20 s 12/10/2022 2:40</p> <p>397,08 Max 352,96 308,84 264,72 220,6 176,48 132,36 88,239 44,12 1,1492e-9 Min</p> <p>0,00 125,00 250,00 375,00 500,00 (mm)</p>		
0	0			
2000	153,1			
4000	202,66			
6000	232,22			
8000	251,38			
10000	254,31			
12000	265,19			
14000	256,6			
16000	261,34			
18000	270,39			
20000	281,97			
22000	296,25			
24000	313,93			
26000	329,18			
28000	341,93			
30000	355,77			
32000	370,1			
34000	383,39			
36000	391,43			
38000	397,08			
<p>Observaciones: Se presentan los resultados del esfuerzo equivalente de Von Mises para cada intervalo de carga, se observa que el material supera el límite de fluencia a los 8 kN por concentración de esfuerzos que se da principalmente en la unión de las cartelas con la brida, que se identifica como la parte más crítica con un esfuerzo máximo de 397,08 MPa a los 38 kN.</p>				

4.1.3. Curva de esfuerzo vs fuerza general (comparación entre modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2)

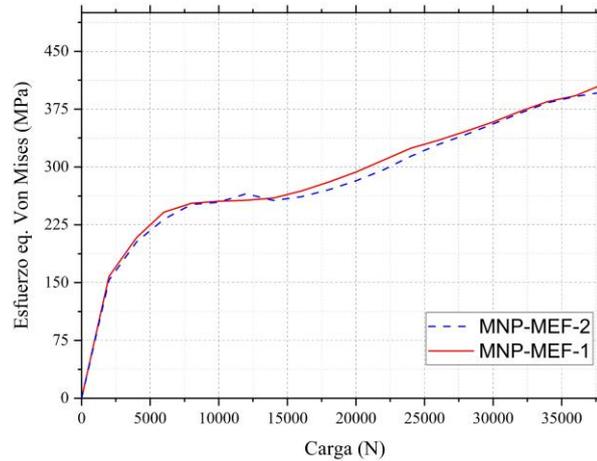


Figura 4- 1. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada, la curva azul corresponde al esfuerzo máximo del modelo MEF completo, la roja al modelo simplificado

En la figura 4-1 se observa el comportamiento no lineal del material, modelado en elementos finitos el esfuerzo equivalente máximo presenta un incremento uniforme hasta los 252,86 kN donde el acero ASTM A36 del monopolo comienza a ceder por acción de las cargas, llegando en este punto a la deformación permanente, generalmente los esfuerzos se concentran en las uniones soldadas de las bridas con las cartelas llegando a un valor de 406,98 MPa cercano al límite de ruptura. La curva del modelo MNP-MEF-1 (modelo completo) se asemeja al modelo simplificado por lo que la variación de resultados entre ambos modelos es mínima.

Los datos para trazar la figura 4-1 fueron tomados en la parte superior de los modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2 donde ocurre la deformación máxima (punto A) que se muestra en la página 50.

4.1.4. Curva de carga vs esfuerzo equivalente máximo localizado en la brida superior (BR-SUP) modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2

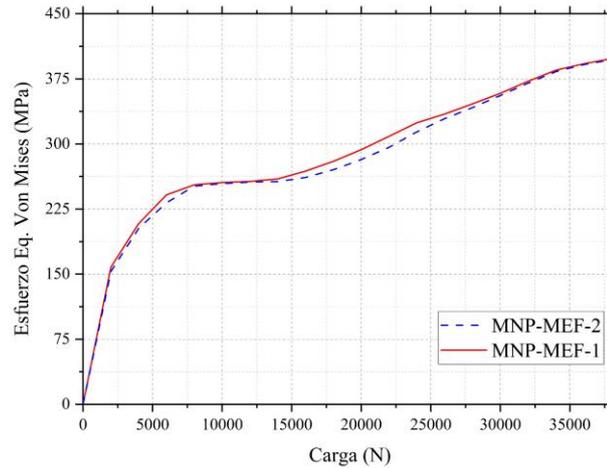


Figura 4- 2. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada en la brida intermedia superior, modelo completo y simplificado [Autor (Resultados del análisis MEF)]

En la figura 4-2 se presenta la curva de esfuerzo equivalente vs carga localizados de los dos modelos de elementos finitos analizados, se observa que el material tanto del modelo simplificado como del completo tiene un comportamiento elástico hasta los 250 MPa, a partir de este punto se entra al rango plástico se observa que ambas curvas tienen un crecimiento similar por lo que se puede decir que ambos modelos de elementos finitos son confiables para predecir los esfuerzos concentrados en las bridas superiores.

4.1.5. Curva de carga vs esfuerzo equivalente máximo localizado brida inferior (BR-INF) modelos MNP-MEF-1 y MNP-MEF-2

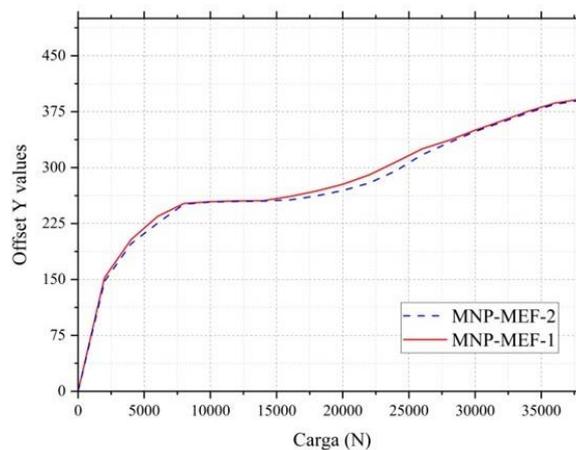


Figura 4- 3. Curvas de esfuerzo equivalente vs carga aplicada en la brida intermedia superior, modelo completo y simplificado [Autor (Resultados del análisis MEF)]

Los esfuerzos localizados en la brida inferior presentan un comportamiento no lineal creciente, a medida que se supera el límite de fluencia del material, las curvas se pronuncian, ambos modelos de elementos finitos planteados presentan un comportamiento estructural similar con ligeras variaciones, luego de superar los 252,86 kN correspondientes al límite de fluencia del acero ASTM A36. Esto demuestra que la simplificación del modelo MEF es confiable para predecir el comportamiento estructural real del monopolo, en el siguiente apartado se presentan los resultados del porcentaje de plastificación de ambas bridas, obtenidos en los nodos que superan el Límite de fluencia del material. El modelo MNP-MEF-1 discretizado con elementos Shell tiene un tiempo de procesamiento de 4 horas, mientras que el simplificado MNP-MEF-2 de 1,5 horas, por tal motivo se puede usar el segundo modelo para obtener resultados de manera más rápida.

4.1.6. Porcentaje de plastificación (MEF)

Tabla 4- 3. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 01-MNP-MEF

Código	Parte	Gráfico	
01-MNP-MEF BR-SUP	Brida superior		
		Número total de nodos:	14128
		Nodos Plastificados:	7121
		Porcentaje de plastificación:	50,4%
01-MNP-MEF BR-INF	Brida inferior		
		Número total de nodos:	14158
		Nodos Plastificados:	7291
		Porcentaje de plastificación:	51,5%

Tabla 4- 4. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 02-MNP-MEF

02-MNP-MEF BR-SUP	Brida superior		
		Número total de nodos:	14128
		Nodos Plastificados:	7502
		Porcentaje de plastificación:	53,10%
02-MNP-MEF BR-INF	Brida inferior		
		Número total de nodos:	14158
		Nodos Plastificados:	7518
		Porcentaje de plastificación:	53,10%

En el modelo de elementos finitos completo 01-MNP-MEF la plastificación del acero corresponde a 50,4% en la brida superior y 51,5% en la brida inferior, mientras que en el modelo simplificado con elemento beam 01-MNP-MEF es ligeramente mayor con un 53,10% para la brida superior e inferior, esto indica que más del 50% del material de las bridas supera el límite de fluencia del material causando deformaciones permanentes que debilitarían estructura en condiciones reales.

4.1.7. Porcentaje de plastificación real.

Para obtener este resultado se calcularon las áreas de las zonas donde existieron deformaciones permanentes en los especímenes de ensayo 01-OCT5-BR6 Y 02-OCT5-BR6, esto permite validar los modelos MEF propuestos para su uso en el diseño de monopolos de telecomunicaciones.

Tabla 4- 5. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 01-OCT5-BR6-MEF

Código	Parte	Gráfico	
01-OCT5-BR6	Brida superior (BR-SUP)		
		Área total:	100556,10 mm ²
		Área plastificada:	46074,48 mm ²
		Porcentaje de plastificación real:	45,82 %
01-OCT5-BR6	Brida inferior (BR-INF)		
		Área total:	100556,10 mm ²
		Área plastificada:	49958,366 mm ²
		Porcentaje de plastificación real:	49,68 %

En la tabla 4-5 se presentan los porcentajes de plastificación real de las bridas inferior y superior del primer espécimen de prueba, en la brida superior se alcanzó un valor correspondiente al 45,82 de área plastificada y en la brida inferior 49,68% en relación con el modelo de elementos finito el porcentaje de plastificación real es menor ya que se midieron las áreas aparentemente deformadas en el ensayo en cada brida.

En este sentido los modelos de elementos finitos son más exactos al calcular la plastificación del elemento dado que toman en cuenta todos los elementos que hayan superado el límite de elasticidad del material , lo que quiere decir que los modelos de elementos finitos planteados son apropiados para verificar la plastificación de la brida apernada.

Tabla 4- 6. Porcentaje de plastificación de las bridas superiores e inferiores del modelo 02-OCT5-BR6.

02-OCT5-BR6	Brida superior (BR-SUP)		
		Área total:	100556,10 mm ²
		Área plastificada:	47820,25 mm ²
		Porcentaje de plastificación real:	47,56 %
02-OCT5-BR6	Brida inferior (BR-INF)		
		Área total:	100556,10 mm ²
		Área plastificada:	49736,75 mm ²
		Porcentaje de plastificación real:	49,46 %

En el segundo espécimen de prueba la plastificación del acero corresponde a 47,56% en la brida superior y 49,46% en la brida inferior, al igual que en el primer espécimen de prueba el valor obtenido por cálculo de áreas no llega a igualar el que se obtuvo por elementos finitos, sin embargo, la variación es poca ya que el modelo MEF es más exacto porque toma en cuenta todos los elementos que hayan superado el límite de elasticidad del material.

Tabla 4- 7. Comparación de los porcentajes de plastificación obtenidos por MEF y experimentales.

Especimen	Porcentaje de plastificación	Modelo	Porcentaje de plastificación	Diferencia
01-OCT5-BR6 BR-SUP	45,82%	01-MNP-MEF BR-SUP	50,40%	4,58%
01-OCT5-BR6 BR-INF	49,68%	01-MNP-MEF BR-INF	51,50%	1,82%
02-OCT5-BR6 BR-SUP	47,56%	02-MNP-MEF BR-SUP	53,10%	5,54%
02-OCT5-BR6 BR-INF	49,46%	02-MNP-MEF BR-INF	53,10%	3,64%
Promedio	48,13%	Promedio	52,03%	3,90%

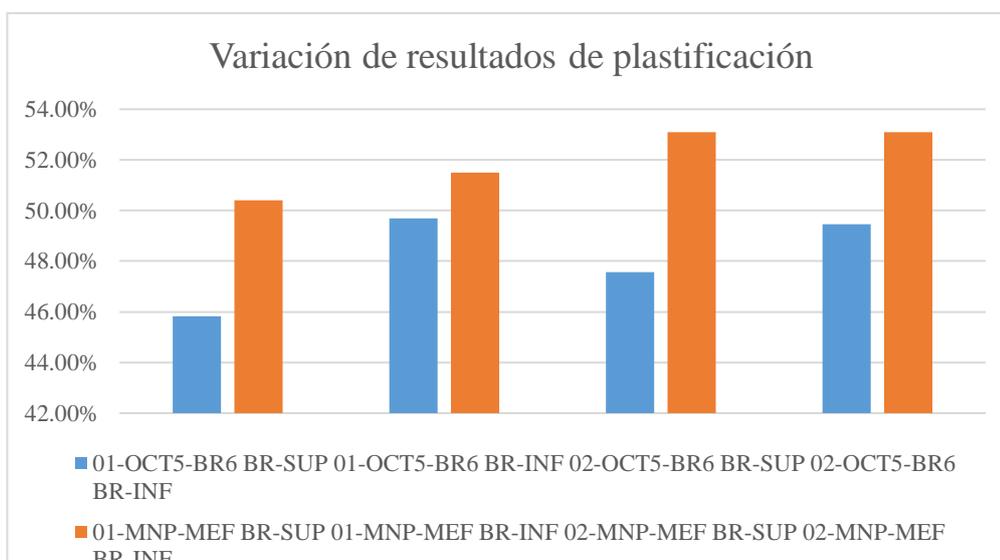


Figura 4- 4. Variación de los porcentajes de plastificación reales y experimentales

Los porcentajes de plastificación medidos en las bridas de los especímenes analizados experimentalmente son menores a los obtenidos con el método de elementos finitos (MEF) se obtuvo un porcentaje de plastificación promedio real de 48,13% mientras que en los modelos de elementos finitos se obtuvo un valor promedio de plastificación del 52,03% con esto se obtuvo una diferencia del 3,90 % con esto se puede decir que el error no es significativo por lo que los modelos de elementos finitos serían útiles para predecir la plastificación de las bridas en condiciones reales, los resultados tanto de los modelos de elementos finitos como de los especímenes experimentales se presenta en la tabla 4-7 y la gráfica comparativa en la figura 4-4.

4.2. Resultados de deformación en el modelo 01-MNP-MEF

Tabla 4- 8. Resultados de la deformación total del prototipo 01-MNP-MEF.

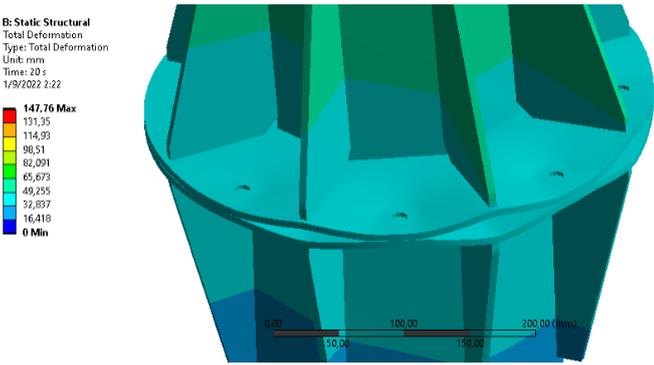
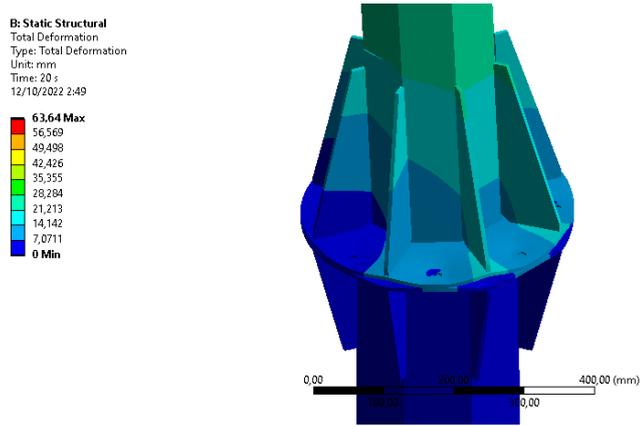
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de simulación	01-MNP-MEF		Espécimen	01-OCT5-BR6
Material	Bridas y octógono	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	N/A
Características de simulación	Cargas aplicadas	Cond. Frontera	Tipo de análisis	Tiempo de procesamiento
	Max: 38 kN Pret. Pernos: 53,38 kN	Todos los DOF Restringidos en la placa base	Estático no lineal	4 horas
Software utilizado	ANSYS Módulo Workbench			
N° de nodos	133346	Tipo de elemento	Shell 181 (superficie)	
N° de elementos	132455	Calidad de malla	0.99957	
Características del ordenador	AMD Ryzen 7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; 32 GB Ram; Tarjeta de video NVIDIA Geforce 8Gb			
Realizado por:	Ing. Danny Muyulema.	Revisado por:	Ing. Francisco Peña. M.Sc.	
		Fecha:	01-09-2022	
RESULTADOS DE SIMULACIÓN				
Carga [N]	Deformación [mm]			
0	0			
2000	2,0472			
4000	3,7894			
6000	5,5401			
8000	7,3495			
10000	9,302			
12000	11,42			
14000	13,825			
16000	16,665			
18000	19,97			
20000	23,965			
22000	28,984			
24000	35,398			
26000	43,207			
28000	52,858			
30000	64,987			
32000	79,521			
34000	96,444			
36000	116,38			
38000	147,76			
<p>Observaciones: Se presentan los resultados de la deformación máxima en cada intervalo de carga, se observa que la deformación máxima a los 38 kN es de 147,76 mm y se localiza en la parte más alta del monopolito que se obtiene en la parte baja de la brida superior en el lado opuesto de la cara donde se aplica la carga, la deformación es permanente ya que el material ha perdido completamente sus propiedades elásticas.</p>				

Tabla 4- 9. Resultados de la deformación total del prototipo 02-MNP-MEF

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
N° de simulación	0-MNP-MEF		Espécimen	01-OCT5-BR6
Material	Bridas y octógono	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	N/A
Características de simulación	Cargas aplicadas	Cond. Frontera	Tipo de análisis	Tiempo de procesamiento
	Max: 38 kN Pret. Pernos: 53,38 kN	Todos los DOF Restringidos en la placa base	Estático no lineal	4 horas
Software utilizado	ANSYS Módulo Workbench			
N° de nodos	52973	Tipo de elemento	Shell 181 (superficie)	
N° de elementos	52254	Calidad de malla	0,99957	
Características del ordenador	AMD Ryzen 7 CPU 2.60 GHz; 16 núcleos; 32 GB Ram; Tarjeta de video NVIDIA Geforce 8Gb			
Realizado por:	Ing. Danny Muyulema.	Revisado por:	Ing. Francisco Peña. M.Sc	
		Fecha:	01-09-2022	
RESULTADOS DE SIMULACIÓN				
Carga [N]	Deformación [mm]			
0	2,78E-02			
2000	0,79441			
4000	1,5219			
6000	2,2616			
8000	3,0288			
10000	3,8671			
12000	4,7895			
14000	5,8225			
16000	7,0517			
18000	8,5337			
20000	10,432			
22000	12,945			
24000	16,68			
26000	21,809			
28000	28,001			
30000	34,946			
32000	42,287			
34000	49,598			
36000	56,704			
38000	63,64			
Observaciones: Se presentan los resultados de la deformación máxima en cada intervalo de carga, se observa que la deformación máxima a los 38 kN es de 63,64 mm y se localiza en la parte más alta del monopolio en el lado opuesto de la cara donde se aplica la carga, la deformación es permanente ya que el material en la simulación ha perdido completamente sus propiedades elásticas.				

4.2.1. Deformación máxima medida.

Luego del ensayo de carga lateral realizado en los especímenes de prueba 01-OCT5-BR6 y 02-OCT5-BR6 se obtuvieron las curvas de fuerza vs deformación, el punto crítico del primer espécimen se alcanzó a los 40,56 kN obteniéndose una deflexión máxima de 171,491 mm mientras que en el segundo espécimen de prueba la

deformación máxima correspondiente a 201,956 mm, se alcanzaron estos valores a los 38 kN no existe una diferencia significativa en la carga crítica sin embargo la deformación máxima en el segundo espécimen fue mayor esto puede estar relacionado con las condiciones de fabricación, montaje o la deformación de los pernos de anclaje al hormigón producto del primer ensayo. Los resultados para cada intervalo de carga se presentan en la tabla 4-10 en comparación con los resultados obtenidos en los modelos MEF.

Tabla 4- 10. Resultados de deflexión máxima de los modelos de elementos finitos y medidos con el sensor LVDT 1 en la parte superior de los especímenes de prueba.

Carga [N]	Deflexión máxima [mm]			
	MNP-MEF-1	MNP-MEF 2	01-OCT5-BR6	02-OCT5-BR6
0	0	0,03	0,002	0,052
2000	2,0472	0,79	1,909	2,364
4000	3,7894	1,52	4,072	5,347
6000	5,5401	2,26	6,607	8,409
8000	7,3495	3,03	9,311	11,755
10000	9,302	3,87	12,619	15,569
12000	11,42	4,79	16,429	19,609
14000	13,825	5,82	20,495	24,171
16000	16,665	7,05	24,718	29,737
18000	19,97	8,53	29,941	35,96
20000	23,965	10,43	36,771	43,481
22000	28,984	12,95	42,914	52,23
24000	35,398	42,29	52,077	64,159
26000	43,207	49,60	62,716	78,97
28000	52,858	54,72	75,945	95,302
30000	64,987	67,24	91,225	114,02
32000	79,521	82,89	109,115	133,73
34000	96,444	95,40	128,864	153,704
36000	116,38	117,31	149,094	175,137
38000	147,76	145,47	171,491	201,956

4.2.2. Curvas fuerza vs deformación máxima, comparación de los modelos de elementos finitos con el primer espécimen de prueba

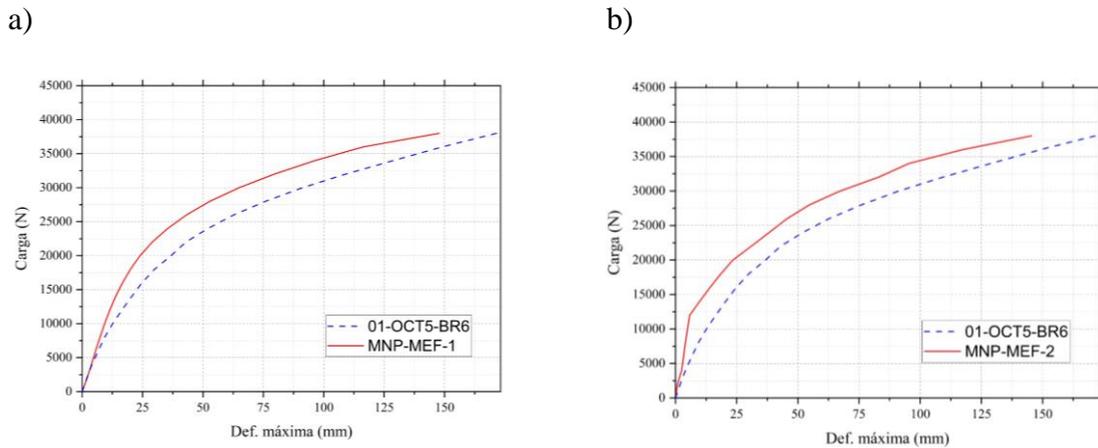


Figura 4- 5. Curva de fuerza vs deformación máxima obtenida en el primer espécimen de prueba a) MNP-MEF-1 b) MNP-MEF-2

En la Figura 4-5 se observa la deformación máxima del monopolo en función de la carga aplicada, el modelo MEF completo registra 147,76 mm de deformación máxima mientras que el simplificado 63,64 mm, en este aspecto hay una variación significativa entre los dos modelos, el modelo MNP-MEF-1 es el que más se ajusta al comportamiento estructural real validado con los resultados del espécimen de prueba 01-OCT5-BR6 las curvas de la figura 4-5 tienen características similares, la deformación máxima medida del primer ensayo tuvo un valor de 171,49 mm.

4.2.3. Curvas fuerza vs deformación máxima, comparación de los modelos de elementos finitos con el segundo espécimen de prueba.

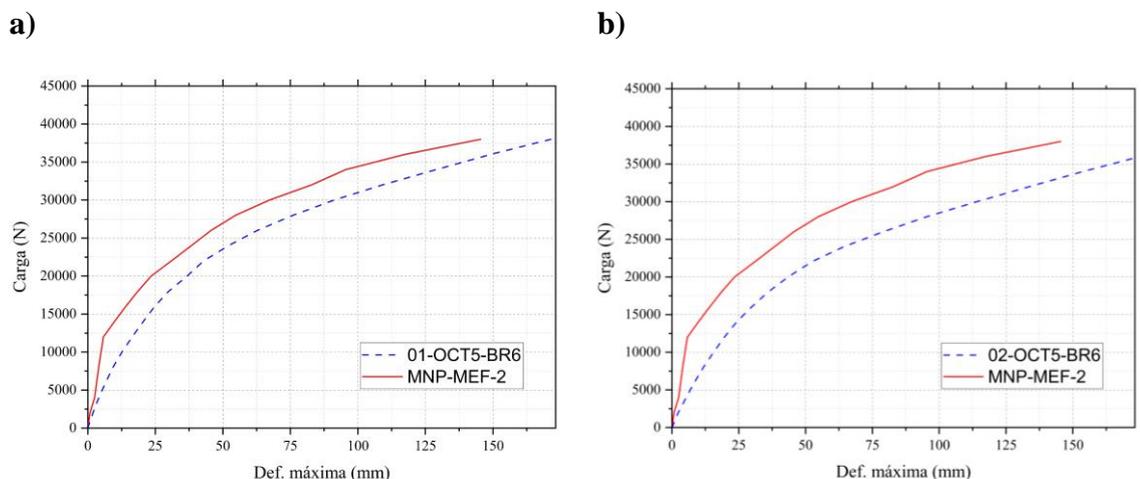


Figura 4- 6. Curva de fuerza vs deformación máxima, comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer y segundo espécimen de prueba

La deformación máxima del monopolo en función de la carga aplicada el modelo MEF completo registra 147,76 mm de deformación máxima mientras que el simplificado 63,64 mm, en este aspecto hay una variación significativa entre los dos modelos, el modelo MNP-MEF-2 al igual que en el primer caso es el que más se ajusta al comportamiento estructural real esto se valida con los resultados del espécimen de prueba 02-OCT5-BR6 las curvas de la figura 4-6 tienen características similares a las que se obtuvieron con el primer espécimen de prueba, la deformación máxima medida del segundo ensayo tuvo un valor de 201,956 mm.

4.2.4. Deformación direccional localizada de la brida intermedia superior.

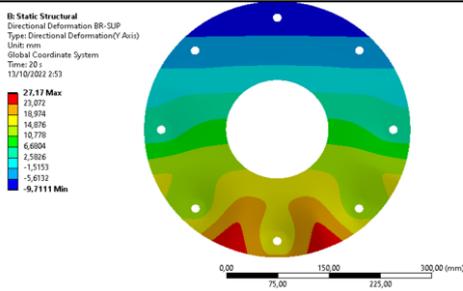
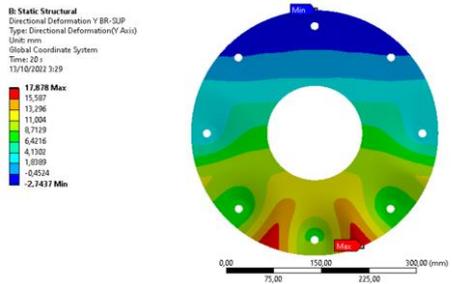
5. Tabla 4- 11. Deformación direccional máxima localizada, brida intermedia superior, resultados del análisis MEF y ensayos físicos.

Carga [N]	Deformación direccional máxima brida intermedia superior [mm]			
	MNP-MEF-1	MNP-MEF 2	01-OCT5-BR6	02-OCT5-BR6
0	0	0	0	0
2000	0,29419	0,16505	-0,008	0,003
4000	0,54701	0,30825	0,032	0,203
6000	0,80704	0,45637	0,298	0,571
8000	1,0835	0,61294	0,557	0,81
10000	1,3987	0,79245	0,824	1,159
12000	1,7537	0,99923	1,254	1,6
14000	2,1853	1,2419	1,749	2,201
16000	2,7208	1,549	2,339	2,855
18000	3,3745	1,9369	2,97	3,492
20000	4,2044	2,4576	3,71	4,44
22000	5,2958	3,1712	4,702	5,619
24000	6,7251	4,2621	5,743	7,079
26000	8,4674	5,7763	7,339	9,043
28000	10,588	7,6095	9,177	11,287
30000	13,138	9,6601	11,582	14,055
32000	16,049	11,808	14,368	16,891
34000	19,208	13,92	17,736	19,819
36000	22,617	15,94	21,104	23,172
38000	27,17	17,878	29,746	26,525

Al aplicar la carga lateral monotónica en la cara frontal del octógono superior en intervalos de 2 kN se obtuvo el registro de deformaciones mediante el sensor LVDT-2 localizado en la unión brida cartela de la cara de aplicación de carga, se observa un comportamiento no lineal llegando a una deformación máxima registrada de 29,746 mm para el primer espécimen de prueba y 26,525 mm para el segundo, se evidencia

un incremento entre 3 y 4 mm para cada intervalo de carga el cual se intensifica en los últimos, con estos datos se obtuvieron las curvas de carga vs desplazamiento donde se compara gráficamente el comportamiento de la brida apernada en la zona de unión con las cartelas.

Tabla 4- 12. Comparación de resultados de deformación de brida superior MEF y experimental.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
Simulación	01-MNP-MEF, 02-MNP-MEF		Especímenes de prueba	01-OCT5-BR6 02-OCT5-BR6
Material	Bridas, octógono y cartelas	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	AWS E71T-8
Características de Ensayo	Cargas aplicadas	Cond. Frontera	Tipo de ensayo	Tiempo de ensayo
	Max: 38 kN Pret. Pernos brida: 53,38 kN Pret. Losa reacción: 4000 Psi	Brida apernada a placa base, cimentación anclada a losa de reacción con pernos de alta resistencia	Carga lateral monotónica Intervalos de carga: 2kN	30 minutos
Deformación local unión brida-cartela inferior (Especimen 01-OCT5-BR6)			Deformación local unión brida-cartela inferior (Especimen 02-OCT5-BR6)	
				
Sensor: LVDT-2 Deformación máxima medida: 29,746 mm			Sensor: LVDT-2 Deformación máxima medida: 26,525 mm	
Deformación local unión brida-cartela derecha (MEF) modelo completo			Deformación local unión brida-cartela derecha (MEF) modelo simplificado	
				
Deformación máxima medida: 27,17 mm			Deformación máxima medida: 17,878 mm	

5.1.1. Curvas fuerza vs deformación localizada, brida intermedia superior, comparación de los modelos de elementos finitos con el primer espécimen de prueba.

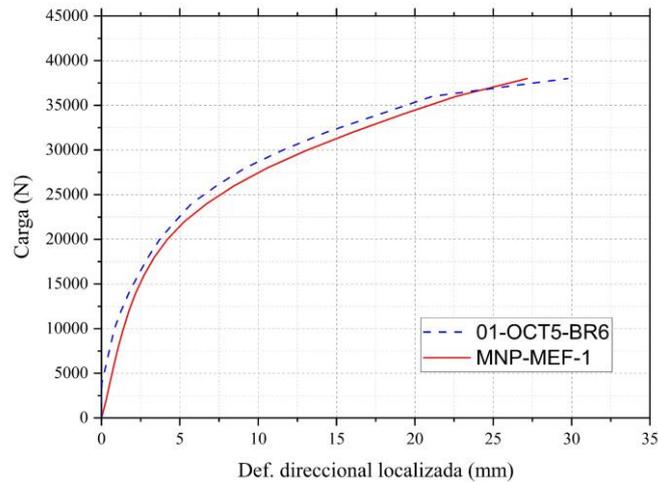


Figura 4- 7. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior, BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos completo y los resultados del primer espécimen de prueba

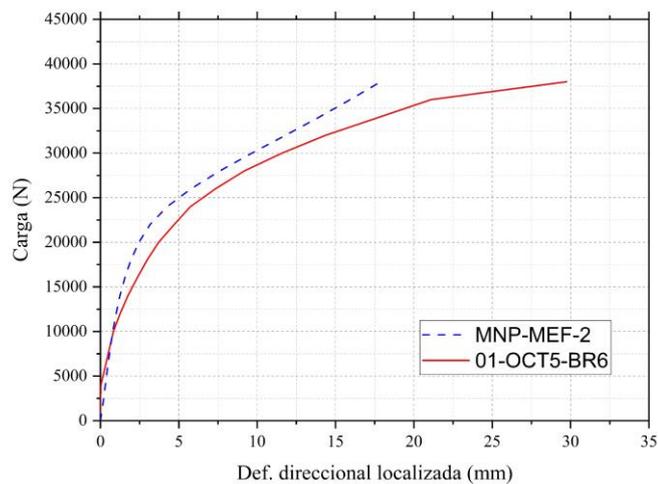


Figura 4- 8. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer espécimen de prueba

En las figuras 4-7 y 4-8 se observa la deformación direccional localizada en la brida superior, el modelo MEF completo registra 27,17 mm, mientras que el simplificado 17,878 mm, en este aspecto hay una variación significativa de aproximadamente 10 mm entre los dos modelos, el modelo MNP-MEF-1 es el que más se ajusta al comportamiento estructural real validado con los resultados del espécimen de prueba

01-OCT5-BR6, la deformación direccional medida en la brida superior en primer ensayo tuvo un valor de 29,746 mm.

5.1.2. Curvas fuerza vs deformación localizada brida intermedia superior, comparación de los modelos de elementos finitos con el segundo espécimen de prueba.

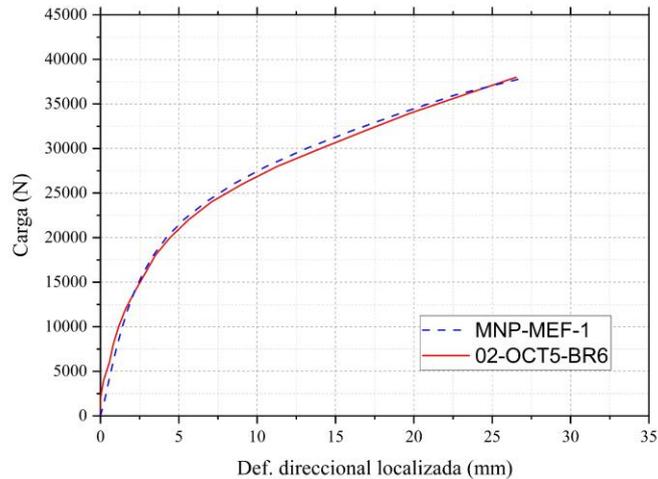


Figura 4- 9. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior BR-SUP comparativa del modelo de elementos finitos completo y los resultados del primer espécimen de prueba

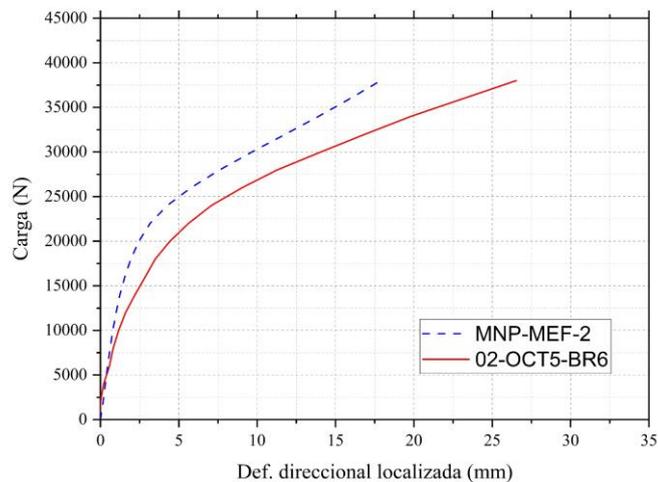


Figura 4- 10. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia superior comparativa del modelo de elementos finitos simplificado y los resultados del primer espécimen de prueba

En las figuras 4-9 y 4-10 se observa la deformación direccional localizada en la brida superior, el modelo MEF completo registra 27,17 mm, mientras que el simplificado 17,878 mm, el modelo MNP-MEF-1 es el que más se ajusta al comportamiento estructural real validado con los resultados del espécimen de prueba 02-OCT5-BR6, la deformación direccional medida en la brida superior en segundo ensayo tuvo un

valor de 26,525 mm. Esto indica que el modelo MEF completo proporciona resultados más cercanos a la realidad.

5.1.3. Deformación direccional localizada brida intermedia inferior comparativa de ambos modelos de elementos finitos.

Tabla 4- 13. Resultados de deformación máxima localizada de la brida intermedia inferior obtenidos de los modelos de elementos finitos.

Carga [N]	Deformación direccional máxima brida intermedia inferior [mm]		
	MNP-MEF-1	MNP-MEF 2	Diferencia
0	0,034051	0,027776	0,006275
2000	0,23593	0,11244	0,12349
4000	0,43695	0,19969	0,23726
6000	0,6418	0,29243	0,34937
8000	0,85444	0,39069	0,46375
10000	1,0882	0,50023	0,58797
12000	1,3413	0,62341	0,71789
14000	1,6147	0,75381	0,86089
16000	1,941	0,90137	1,03963
18000	2,322	1,0803	1,2417
20000	2,7993	1,3136	1,4857
22000	3,4889	1,6493	1,8396
24000	4,4245	2,25	2,1745
26000	5,559	3,1024	2,4566
28000	6,9518	4,1195	2,8323
30000	8,6659	5,2343	3,4316
32000	10,675	6,3985	4,2765
34000	12,939	7,546	5,393
36000	15,512	8,6515	6,8605
38000	19,337	9,7189	9,6181

En los ensayos experimentales no se colocó un sensor por debajo de la brida inferior por condiciones adversas en el montaje, la comparación se realiza entre los resultados obtenidos en los modelos MEF completos y simplificados, existe una variación significativa de resultados, en el modelo MNP-MEF-1 se duplica el valor máximo, en las curva de la figura 4-13 se aprecia que la curva de la simulación completa llega a un valor mayor, mientras que la curva de la simulación simplificada es más pronunciada pero alcanza un valor de 9,72 mm a los 38 kN.

5.1.4. Curvas fuerza vs deformación localizada brida intermedia inferior, comparación de los modelos de elementos finitos.

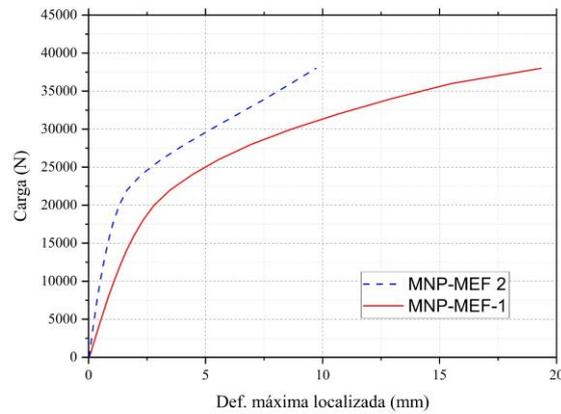


Figura 4- 11. Curva de fuerza vs deformación máxima localizada en la brida intermedia inferior BR-INF

4.2.4. Deformación máxima brida intermedia parte posterior (Palpador)

Tabla 4- 14. Deformación vertical local de la parte posterior de la brida apernada

Carga	01-OCT5-BR6	02-OCT5-BR6	Diferencia
kN	mm	mm	mm
2	0,13	0,23	0,1
4	0,2	0,36	0,16
6	2,79	0,58	2,21
8	3	0,76	2,24
10	3,4	0,99	2,41
12	3,48	1,22	2,26
14	3,61	1,5	2,11
16	3,84	1,78	2,06
18	4,01	2,11	1,9
20	4,29	2,16	2,13
22	4,65	2,44	2,21
24	4,93	3,18	1,75
26	4,95	3,48	1,47
28	5,28	4,29	0,99
30	5,77	5,08	0,69
32	6,48	6,02	0,46
34	7,32	7,26	0,06
36	8,28	7,57	0,71
38	10,49	7,85	2,64
40	11,1	9,25	1,85
42	11,71	10,64	1,07
44	12,32	12,04	0,28
46	12,93	13,44	0,51

Se ubico un palpador de reloj analógico en la parte inferior de la brida en el lado posterior de ambos especímenes de prueba, durante el ensayo con la finalidad de medir la deformación vertical del lado de la brida sometido a compresión, se obtuvieron deformaciones máximas de 12,93 mm y 13,44 mm para los especímenes 01-OCT5-BR6 y 02-OCT5-BR6 respectivamente, al igual que en las zonas anteriores el desplazamiento fue registrado en cada incremento de 2 kN en ambos casos se llegó al valor máximo a una carga de 46 kN, a los 38 kN que es el valor estimado de falla de la brida apernada por MEF se obtuvieron 10,49 mm y 7,85 mm

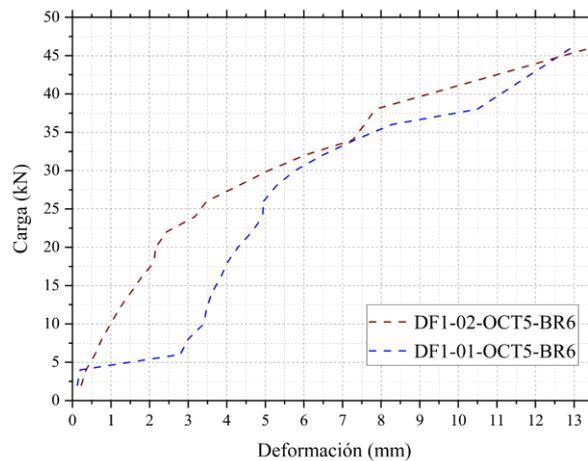
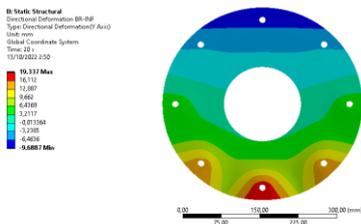
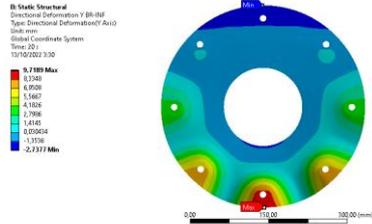


Figura 4- 12. Curvas de fuerza vs deformación local de la parte posterior de la brida apernada en el lado opuesto de la cara de aplicación de carga [Autor (Resultados del análisis MEF)]

Las curvas de carga deformación de ambos especímenes de prueba muestran una deformación no lineal a compresión de la parte inferior de la brida en la cara opuesta de la aplicación de la carga. Se observa una variación significativa para el comportamiento estructural de ambos especímenes en el rango plástico que va de 0 hasta aproximadamente 30 kN, por otro lado, en el rango elástico la variación es menor llegando a un comportamiento similar a aproximadamente 45 kN.

Respecto a los modelos de elementos finitos en la tabla 4-12 se presentan los datos comparativos de los cuales tenemos para ambos especímenes deformaciones de 12,93 mm y 13,44 mm registrados en el ensayo mientras que en la simulación se obtuvo una deformación máxima a compresión de 8,70 mm. Los resultados obtenidos por ensayo destructivo son aproximados a los que se obtienen en el análisis MEF, Se obtiene un error máximo de 1,79 el cual no es significativo.

Tabla 4- 15. Resultados del ensayo: Deformaciones locales del parte posterior de la brida del prototipo de monopolo, validado con análisis 01-MNP-MEF.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
Validado con simulación	01-MNP-MEF		Especímenes de prueba	01-OCT5-BR6 02-OCT5-BR6
Material	Bridas, octógono y cartelas	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	AWS E71T-8
Características de Ensayo	Cargas aplicadas	Cond. Frontera	Tipo de ensayo	Tiempo de ensayo
	Max: 38 kN Pret. Pernos brida: 53,38 kN Pret. Losa reacción: 4000 Psi	Brida apernada a placa base, cimentación anclada a losa de reacción con pernos de alta resistencia	Carga lateral monotónica Intervalos de carga: 2kN	30 minutos
Medición		Medición		
Deformación local unión brida-cartela posterior (Espécimen 01-OCT5-BR6)		Deformación local unión brida-cartela posterior (Espécimen 02-OCT5-BR6)		
				
Sensor: DF-1 Deformación máxima medida 38 kN: 10,49 mm		Sensor: DF-1 Deformación máxima medida 38 kN: 7,85 mm		
Deformación local unión brida-cartela posterior (Modelo MNP-MEF-1)		Deformación local unión brida-cartela posterior (Modelo MNP-MEF-2)		
				
Sensor: DF-1 Deformación máxima medida 38 kN: 7,85 mm		Deformación máxima medida: 8,7011 mm Error: $\pm 1,79 \text{ mm}$ $\pm 0,85 \text{ mm}$		

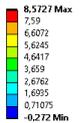
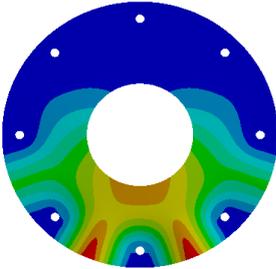
4.2.5. Deformación de la placa base (LVDT-5)

Tabla 4- 16. Deformación local de la brida de la base

Carga [N]	Deformación direccional máxima brida intermedia inferior [mm]		
	MNP-MEF-1	01-OCT5-BR6	02-OCT5-BR6
0	8,68E-03	0,001	0,001
2036,99	3,28E-02	0,068	0,074
4097,665	6,42E-02	0,167	0,178
6039,473	0,10108	0,297	0,283
8028,947	0,1424	0,379	0,396
10089,474	0,19018	0,513	0,53
12078,947	0,2497	0,6	0,675
14115,789	0,32163	0,703	0,844
16152,631	0,42425	1,033	1,043
18094,737	0,54856	1,317	1,274
20060,524	0,70383	1,583	1,554
22002,63	0,90294	1,86	1,86
24110,525	1,1696	2,135	2,282
26028,945	1,517	2,41	2,746
28042,103	1,9886	3,279	3,345
30055,989	2,6375	4,147	4,131
32045,512	3,466	5,015	5,023
34035,033	4,5262	5,883	6,127
36022,816	5,9146	6,751	7,04
38012,236	8,5727	7,619	8,466

La placa base tiene un comportamiento diferente de las bridas de la parte intermedia superior, ya que tiene un espesor mayor y se ancló a la cimentación mediante pernos de mayor tamaño y capacidad. En los datos obtenidos se observa una deformación creciente en rangos de 1 mm aproximadamente para cada intervalo de carga llegando a una deformación máxima de 7,619 mm en el espécimen 01-OCT5-BR6 y 8,466 mm en el segundo espécimen con una diferencia de aproximadamente 1 mm que supone un valor aceptable. Con estos datos se trazaron las curvas de carga vs desplazamiento de la figura 4-16. El modelo MEF simplificado no cuenta con placa base modelada, ya que la parte inferior y superior del monopolo se discretizó como elemento beam, por lo que la validación se realiza únicamente con los resultados del modelo MEF completo.

Tabla 4- 17. Resultados del ensayo: Deformaciones locales de la placa base del prototipo de monopolo, simulación 01-MNP-MEF.

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRIA EN INGENIERÍA CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS METÁLICAS			
Simulación	01-MNP-MEF		Especímenes de prueba	01-OCT5-BR6 02-OCT5-BR6
Material	Bridas, octógono y cartelas	Hormigón de la cimentación	Pernos	Mat. Aporte Soldadura
	ASTM A36	$f'_c=300 \text{ kg/cm}^2$	ASTM A325	AWS E71T-8
Características de Ensayo	Cargas aplicadas	Cond. Frontera	Tipo de ensayo	Tiempo de ensayo
	Max: 38 kN Pret. Pernos brida: 53,38 kN Pret. Losa reacción: 4000 Psi	Brida apernada a placa base, cimentación anclada a losa de reacción con pernos de alta resistencia	Carga lateral monotónica Intervalos de carga: 2kN	30 minutos
Deformación local unión brida-cartela inferior (Especimen 01-OCT5-BR6)			Deformación placa base (Especimen 02-OCT5-BR6)	
				
Sensor: LVDT-5 Deformación máxima medida: 7,61 mm			Sensor: LVDT-5 Deformación máxima medida: 8,46 mm	
Resultados de deformación Máxima obtenida en el modelo 01-MNP-MEF				
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> <p>B: Static Structural Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 20 s 13/10/2022 2:58</p>  </div> <div style="flex: 2; text-align: center;">  <p>0,00 75,00 150,00 225,00 300,00 (mm)</p> </div> </div>				
Deformación máxima obtenida: 8,57 mm				

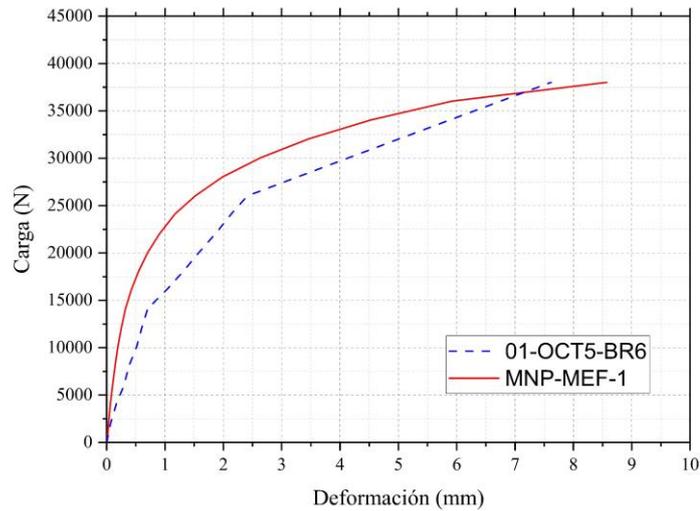


Figura 4- 13. Curvas de fuerza vs deformación local de la brida de la base comparación con el primer espécimen de prueba [Autor (Resultados del análisis MEF)]

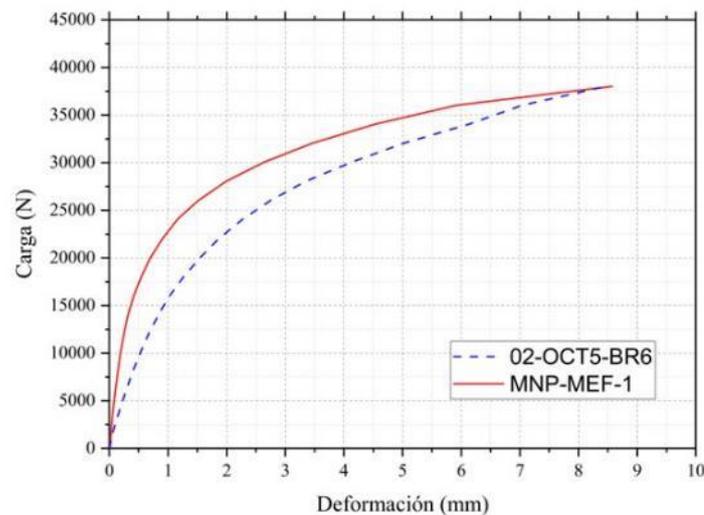


Figura 4- 14. Curvas de fuerza vs deformación local de la brida de la base comparación con el segundo espécimen de prueba [Autor (Resultados del análisis MEF)]

En la placa base según los resultados de ambos ensayos destructivos se observa un comportamiento similar en el rango plástico con variaciones mínimas, por otro lado en el rango elástico se observa que existen variaciones no significativas para ambos ensayos, la deformación máxima obtenida en relación con la carga aplicada es inferior a la que se genera en las bridas superiores, debido al momento y el espesor reducido de estas.

En la figura 4-14 se presenta una comparativa entre los ensayos experimentales destructivos y el modelo de elementos finitos. En los datos medidos de deformación

producto de la carga aplicada en el ensayo de carga lateral se obtuvieron desplazamientos máximos en sentido vertical de 12,78 mm y 13,38 mm para ambos especímenes, mientras que en el modelo MEF se obtuvo una deformación máxima de 8,4205 mm con esto se calculó una diferencia máxima de 4,368 mm entre el modelo real y el teórico la cual es significativa, esta diferencia puede estar relacionada con aspectos de la construcción, el montaje y la instrumentación en la ejecución de los ensayos.

4.2.6. Validación de resultados del análisis MEF con las pruebas experimentales

Tabla 4- 18. Deformación máxima medida en los ensayos de carga lateral para los especímenes 01-OCT5-BR6 y 02-OCT5-BR6 validados con las deformaciones máximas obtenidas en el análisis 01-MNP-MEF.

N° de orden	Especímen 01-OCT5-BR6		Especímen 02-OCT5-BR6		Análisis 01-MNP-MEF		Diferencia 01-OCT5-BR6	Diferencia 02-OCT5-BR6
	CLDC-01	LVDT-1	CLDC-01	LVDT-1	Carga	Def.		
	Carga	Def.	Carga	Def.				
	N	mm	N	mm	N	mm		
1	0	0,002	0	0,052	0	0	0,002	0,052
3	2065,863	1,909	2036,99	2,364	2000	2,047	0,138	0,316
4	4060,489	4,072	4097,665	5,347	4000	3,789	0,282	1,558
5	6031,37	6,607	6039,473	8,409	6000	5,54	1,066	2,869
6	8047,989	9,311	8028,947	11,755	8000	7,35	1,961	4,405
7	10065,921	12,619	10089,474	15,569	10000	9,302	3,317	6,267
8	12107,594	16,429	12078,947	19,609	12000	11,42	5,009	8,189
9	14101,786	20,495	14115,789	24,171	14000	13,825	6,67	10,346
10	16116,207	24,718	16152,631	29,737	16000	16,665	8,053	13,072
11	18015,024	29,941	18094,737	35,96	18000	19,97	9,971	15,99
12	20269,872	36,771	20060,524	43,481	20000	23,965	12,806	19,516
13	22046,277	42,914	22002,63	52,23	22000	28,984	13,93	23,246
14	24134,621	52,077	23968,421	64,159	24000	35,398	16,679	28,761
15	26056,847	62,716	26028,945	78,97	26000	43,207	19,509	35,763
16	28074	75,945	28042,103	95,302	28000	52,858	23,087	42,444
17	30037,875	91,225	30055,989	114,02	30000	64,987	26,238	49,033
18	32030,907	109,115	32116,563	133,73	32000	79,521	29,594	54,209
19	34047,672	128,864	34035,033	153,704	34000	96,444	32,42	57,26
20	36011,751	149,094	35975,442	175,137	36000	116,38	32,714	58,757
21	38028,221	171,491	38012,236	201,956	38000	147,76	23,731	54,196

En la tabla 4-18 se presentan los resultados obtenidos de ambos ensayos destructivos de carga lateral para intervalos de carga de 2 kN se observan incrementos de aproximadamente 3 mm en el rango plástico mientras que en el rango plástico el incremento es mayor llegando a los 20 mm antes de la falla del material. Se registró una deformación máxima de 171,49 mm para el primer espécimen y 201,956 mm para el segundo, comparado con los 147,76 mm obtenidos en el modelo de elementos finitos.

4.2.6.1. Curvas fuerza vs deformación (Comparación MEF y experimental)

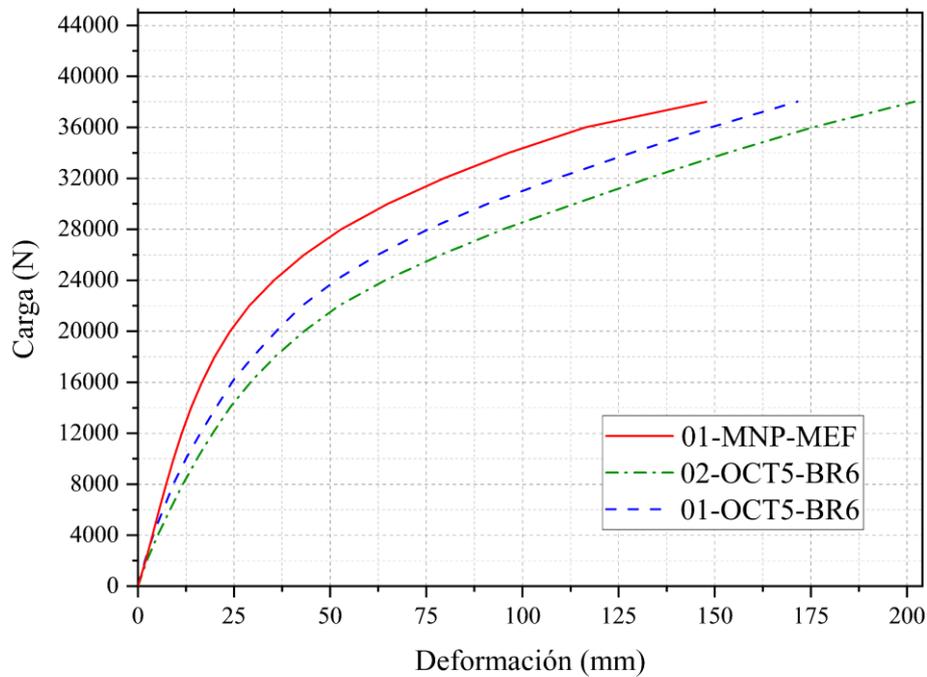


Figura 4- 15. Gráfica comparativa de curvas de fuerza vs deformación máxima de los ensayos 01-OCT5-BR6, 02-OCT5-BR6 y el análisis MEF

Los desplazamientos registrados en los ensayos destructivos de carga lateral tienen una aproximación a los obtenidos por el método de elementos finitos, el modelo MEF que más se ajusta es la simulación 01-MNP-MEF en las curvas de la Figura 4-15 existen variaciones tanto en el rango elástico como en el plástico, sin embargo, la tendencia de crecimiento de las curvas del modelo de elementos finitos completo como de los dos ensayos de carga lateral es la misma y no es significativa por lo que el modelo matemático de elementos finitos es aceptado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Mediante la revisión bibliográfica en investigaciones previas y normas de diseño fabricación y montaje se definieron las características geométricas de los especímenes de prueba, que constan en el plano del Anexo 1 y las condiciones de carga con las cuales se obtuvieron resultados satisfactorios tanto en el análisis de elementos finitos como en el ensayo de carga lateral.
- Para el modelo de elementos finitos del prototipo de monopolo se consideró una idealización de material no lineal isotrópico definido en los datos de ingeniería del software con los valores de la curva de tensión vs deformación del acero ASTM A36.
- Para simular la brida apernada del mismo modo se planteó un modelo de material no lineal isotrópico para los pernos ASTM A325 utilizando 4 puntos de la curva característica correspondiente al material de estos elementos de unión.
- El tipo de elemento utilizado en el análisis de elementos finitos fue Shell 181 que es ideal para el modelado de estructuras de láminas delgadas a moderadamente gruesas, el elemento tiene 4 nodos con 6 grados de libertad en cada uno. Esto simuló adecuadamente los desplazamientos y rotaciones producto de la aplicación de la carga lateral.
- Para simular la junta apernada en los pernos se planteó un elemento del tipo beam 188 que es idóneo para el análisis estructural de vigas esbeltas a modernamente gruesas, este tipo de discretización comprende el análisis de efectos de deformación por cizallamiento.
- Las condiciones de frontera establecidas en el modelo MEF fueron desplazamientos y rotaciones nulos en todos los sentidos en la brida base, contactos friccionales less en las bridas apernadas y topologías compartidas en las uniones de cada pieza de los subensambles del modelo.
- Para la aplicación de la fuerza fue necesario configurar el análisis con 20 pasos de tiempo de 1 segundo cada uno esto permitió establecer intervalos de carga cada 2 kN hasta llegar a la fluencia del material a aproximadamente 38 kN.

- El esfuerzo equivalente máximo obtenido en el modelo de elementos finitos fue de 406,98 MPa, localizado en la unión de la brida con las cartelas de la cara de aplicación de la carga, mientras que la deformación máxima fue de 147,76 mm en la parte más alta del octógono superior.
- En el modelo de elementos finitos la deformación local máxima en el eje y se produjo en la unión de la brida superior con las cartelas en la cara de aplicación de la carga y tuvo un valor aproximado de 26,17 mm, lo cual se validó con los ensayos, midiéndose 29,746 mm en el espécimen 01-OCT5-BR6 y 26,525 mm en el espécimen 02-OCT5-BR6 obteniendo una variación no significativa de 3,221 mm.
- En los ensayos se obtuvieron deformaciones máximas de 171,491 mm y 201,956 mm en el primer y segundo espécimen en comparación con la deformación máxima obtenida en el modelo MEF se obtuvo una diferencia de 54,196 mm en la parte más alta del octógono superior en la cara opuesta de aplicación de la carga.
- Las curvas obtenidas para las deformaciones locales en los puntos de interés establecidos tienen similitud en los dos especímenes de prueba ensayados, no existen variaciones significativas salvo en las curvas obtenidas con el deformímetro en la parte posterior, donde se observaron variaciones en la zona plástica de las curvas.

5.2.Recomendaciones

- En la etapa de preprocesado del modelo de elementos finitos verificar la topología compartida en cada subensamble y que el tipo de contacto de las bridas apernadas sea del tipo friccional less esto garantiza que las condiciones de frontera del modelo MEF estén bien establecidas y no se generen errores en la solución.
- Antes del ensayo colocar los sensores LVDT teniendo en cuenta que durante la aplicación de la carga exista base en donde apoyar el vástago para evitar errores en la lectura de los desplazamientos, estos sensores no se pueden fijar a las caras de las bridas ya que los palpadores se pueden dañar por la flexión ocasionada por las cargas.
- En la etapa de montaje se puede garantizar el contacto adecuado de las bridas con una limpieza previa de las superficies removiendo residuos de polvo, gotas de soldadura y escoria que pueden ocasionar deslizamientos o irregularidades comprometiendo el ensayo.
- Para adquirir datos más precisos en los puntos deseados en futuras investigaciones sería más adecuado implementar sensores strain gauge que son adhesivos y no se ven afectados por el desplazamiento de las caras de las bridas causados por las cargas.
- Aplicar el torque adecuado en los pernos estructurales, de modo que se garantice el ajuste según el código AISC-360, para ello es necesario utilizar un torquímetro calibrado según la designación del perno, seleccionando en el dial el valor del torque y apretando la tuerca sujetando la cabeza del perno hasta escuchar el sonido indicativo en el equipo que indica que se ha alcanzado el par determinado.
- Antes de diseñar las semi secciones de los octógonos verificar el radio de pliegue disponible en la matriz de la plegadora con esto se garantiza que todos los lados del octógono fabricado sean de la misma medida y los especímenes ensayados sean similares al modelo de elementos finitos.
- En las bridas respetar los 2 mm de holgura para los agujeros de los pernos que se recomienda en el código AISC-360 esto previene que se dañen los hilos de las roscas en los anclajes de la placa base durante el montaje y cambio de especímenes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CNT, *Historia de las telecomunicaciones en el Ecuador*. 2014.
- [2] F. Peña, “Lineamientos para el dimensionamiento de torres de telecomunicaciones,” *Univ. Técnica Ambato*, vol. 1, no. 69, pp. 5–24, 2017.
- [3] R. Balagopal, N. Prasad Rao, R. P. Rokade, and P. K. Umesha, “Experimental Investigation on Strengthening of Bolted Connections in Transmission/Communication Towers,” *J. Inst. Eng. Ser. A*, vol. 99, no. 2, pp. 269–277, 2018, doi: 10.1007/s40030-018-0287-6.
- [4] B. Blachowski and W. Gutkowski, “Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring,” *Eng. Struct.*, vol. 111, pp. 93–103, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.12.018.
- [5] M. Pavan Kumar, P. Markandeya Raju, M. Navya, and G. T. Naidu, “Effect of wind speed on structural behaviour of Monopole and self-support telecommunication towers,” *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 6, pp. 911–927, 2017.
- [6] X. C. Liu, X. N. He, H. X. Wang, Z. W. Yang, S. H. Pu, and Z. Ailin, “Bending-shear performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 145, pp. 28–48, 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.02.017.
- [7] J. Jubinville-baron and A. Mechanics, “Finite Element Analysis of Vibrations on Flexible Structures due to Turbulent Wind,” no. August, 2019.
- [8] G. F. Giaccu and L. Caracoglia, “Wind-load fragility analysis of monopole towers by Layered Stochastic-Approximation-Monte-Carlo method,” *Eng. Struct.*, vol. 174, no. April, pp. 462–477, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.081.
- [9] F. Huang, D. Zhang, W. Hong, and B. Li, “Mechanism and calculation theory of prying force for flexible flange connection,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 132, pp. 97–107, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.01.014.
- [10] M. Couchaux, M. Hjiyaj, I. Ryan, and A. Bureau, “Bolted circular flange connections under static bending moment and axial force,” *J. Constr. Steel Res.*,

- vol. 157, pp. 314–336, 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.12.024.
- [11] M. Couchaux, M. Hjiiaj, I. Ryan, and A. Bureau, “Tensile resistances of bolted circular flange connections,” *Eng. Struct.*, vol. 171, pp. 817–841, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.04.004.
- [12] L. Ślęczka and D. Leń, “Prying action in bolted circular flange joints: Approach based on component method,” *Eng. Struct.*, vol. 228, p. 111528, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.111528.
- [13] P. Nazarko and L. Ziemianski, “Force identification in bolts of flange connections for structural health monitoring and failure prevention,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 460–467, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROSTR.2017.07.142.
- [14] P. C. B. Luyt, N. J. Theron, and F. Pietra, “Non-linear finite element modelling and analysis of the effect of gasket creep-relaxation on circular bolted flange connections,” *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 150, pp. 52–61, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.IJPVP.2016.12.001.
- [15] M. Pavlović *et al.*, “Connections in towers for wind converters, part I: Evaluation of down-scaled experiments,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 115, pp. 445–457, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.JCSR.2015.09.002.
- [16] X. C. Liu, X. N. He, H. X. Wang, and A. L. Zhang, “Compression-bend-shearing performance of column-to-column bolted-flange connections in prefabricated multi-high-rise steel structures,” *Eng. Struct.*, vol. 160, pp. 439–460, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.01.026.
- [17] X. C. Liu *et al.*, “Tension–bend–shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column,” *Eng. Struct.*, vol. 201, no. October, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109798.
- [18] H. Deng, X. Song, Z. Chen, P. Fu, and J. Dong, “Experiment and design methodology of a double-layered flange connection in axial loads,” *Eng. Struct.*, vol. 175, pp. 436–456, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.08.040.
- [19] S. Sun, M. Zhou, W. Lu, and A. Davarpanah, “Application of symmetry law in numerical modeling of hydraulic fracturing by finite element method,”

- Symmetry (Basel)*., vol. 12, no. 7, pp. 18–20, 2020, doi: 10.3390/sym12071122.
- [20] G. Uva, F. Porco, A. Fiore, and S. Ruggieri, “Effects in Conventional Nonlinear Static Analysis: Evaluation of Control Node Position,” *Structures*, vol. 13, no. November 2017, pp. 178–192, 2018, doi: 10.1016/j.istruc.2017.12.006.
- [21] C. Li, H. Z. Deng, Y. R. Gao, X. Q. Song, and X. Y. Hu, “Compression analysis of external double-layered flange connection in transmission tower,” *Structures*, vol. 33, pp. 3002–3016, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2021.06.037.
- [22] S. Seifi, K. C. Park, and H. S. Park, “A staggered explicit–implicit finite element formulation for electroactive polymers,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 337, pp. 150–164, 2018, doi: 10.1016/j.cma.2018.03.028.
- [23] J. Ye, Y. Yan, J. Li, Y. Hong, and Z. Tian, “3D explicit finite element analysis of tensile failure behavior in adhesive-bonded composite single-lap joints,” *Compos. Struct.*, vol. 201, no. August 2017, pp. 261–275, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.134.
- [24] E. Madenci, M. Dorduncu, A. Barut, and N. Phan, “A state-based peridynamic analysis in a finite element framework,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 195, pp. 104–128, 2018, doi: 10.1016/j.engfracmech.2018.03.033.
- [25] M. Shahmohamadi, A. Khojasteh, and M. Rahimian, “Frictionless contact of a rigid disk with the face of a penny-shaped crack in a transversely isotropic solid,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 106–107, pp. 274–283, 2017, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2016.11.002.
- [26] MechHead, “Ansys Contact Types and Explanations - Mechead.com,” 2020. <https://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/> (accessed May 07, 2022).
- [27] K. B. Yilmaz, Çömez, M. A. Güler, and B. Yildirim, “Sliding frictional contact analysis of a monoclinic coating/isotropic substrate system,” *Mech. Mater.*, vol. 137, no. April, p. 103132, 2019, doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103132.
- [28] N. Jamia, H. Jalali, J. Taghipour, M. I. Friswell, and H. Haddad Khodaparast, “An equivalent model of a nonlinear bolted flange joint,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 153, p. 107507, 2021, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.107507.

- [29] N. M. Shajahan, T. Kuruvila, A. Sasikumar, and D. Davis, “Automated Inspection of Monopole Tower Using Drones and Computer Vision,” *Proc. - 2019 2nd Int. Conf. Intell. Auton. Syst. ICoIAS 2019*, pp. 187–192, 2019, doi: 10.1109/ICoIAS.2019.00040.
- [30] X. N. Wang, Q. Sun, Z. Zheng, and H. S. Di, “Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 699, no. April, pp. 18–25, 2017, doi: 10.1016/j.msea.2017.05.078.
- [31] R. Ghafoori-Ahangar and Y. Verreman, “Fatigue behavior of load-carrying cruciform joints with partial penetration fillet welds under three-point bending,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 215, no. November 2018, pp. 211–223, 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.05.015.
- [32] Weld Guru, “Full Penetration Weld Explained: What Is It?,” 2017. <https://weldguru.com/what-is-full-penetration-weld/> (accessed May 07, 2022).
- [33] X. Zhang, L. Tang, X. Li, X. Ling, and A. Chan, “Effect of the combined action of lateral load and axial load on the pile instability in liquefiable soils,” *Eng. Struct.*, vol. 205, no. August 2019, p. 110074, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110074.
- [34] Centro de investigación de la vivienda EPN, *Ensayo de carga lateral*, vol. 1. 2021, p. 1.
- [35] H. U. Sajid and R. Kiran, “Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 920–945, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.006.
- [36] A. Shrih, A. Rahman, and M. Mahamid, “Finite element analysis of tension-loaded ASTM A325 bolts under simulated fire loading,” *J. Struct. Fire Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 2–18, Feb. 2018, doi: 10.1108/JSFE-06-2016-0006/FULL/XML.
- [37] M. Abdel-Jaber and R. El-Nimri, “Comparative investigation, numerical modeling, and buckling analysis of one-way reinforced concrete wall panels,” *Results Eng.*, vol. 14, no. May, p. 100459, 2022, doi:

10.1016/j.rineng.2022.100459.

- [38] A. Shah, A. G. Wilson, and Z. Ghahramani, “Student-t processes as alternatives to Gaussian processes,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 33, pp. 877–885, 2014.

ANEXOS.

ANEXO 1: Plano de la cimentación.

ANEXO 2: Plano del prototipo de monopolo de telecomunicaciones.

ANEXO 3. Especificación de procedimientos de soldadura (WPS)

ANEXO 4. Registro de calificación del procedimiento de soldadura (PQR)