



Vigilada Mineducación

**Diseño por elementos finitos de uniones para postes seccionados
fabricados en materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con
fibra de vidrio, empleados como estructuras de soporte en redes aéreas de
baja y media tensión**

ANDRÉS FELIPE FRANCO BEDOYA

Artículo para maestría de profundización en ingeniería

Asesor:

Luis Santiago París Londoño

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2021

Diseño por elementos finitos de uniones para postes seccionados fabricados en materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibra de vidrio, empleados como estructuras de soporte en redes aéreas de baja y media tensión

Andrés Felipe Franco Bedoya

Grupo de Investigación IEXS (Ingeniería Energía Exergía y Sostenibilidad), Escuela de Ingenierías, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. Octubre 2021.

RESUMEN

La infraestructura tradicional y más ampliamente empleada para transmitir y distribuir energía eléctrica son las redes aéreas. En ellas se usan como estructuras de soporte postes, los cuales comúnmente han sido fabricados en madera, concreto y acero; recientemente, por sus atributos como: alta resistencia mecánica, desempeño a la intemperie, aislamiento eléctrico y bajo peso se ha masificado el uso del Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) en especial para zonas apartadas con dificultades de acceso.

No obstante, para alcanzar ubicaciones remotas, se requiere mejorar aún más la condición logística, por lo cual los postes se fabrican y transportan en secciones independientes, de modo que al llegar al sitio de instalación son ensamblados hasta su longitud final. En el presente trabajo se muestra el análisis de los parámetros geométricos de la unión y su incidencia en el desempeño mecánico en lo relacionado con esfuerzo y deflexión, encontrando combinaciones óptimas en cuanto al peso completo de la estructura, lo cual asegura un desempeño estructural adecuado y una mejor capacidad de transporte al reducir de manera segura la masa. Para ello se empleó el software de elementos finitos ANSYS R15 y por medio de una modelación de elementos "SHELL" se observa el comportamiento mecánico y se analiza respecto al esfuerzo y la deflexión de cada uno de los modelos, encontrándose que el espesor de la sección de unión tiene poca influencia en el desempeño estructural, no obstante, la resistencia y rigidez del poste tienen una alta incidencia en la longitud de traslape o unión de ambas secciones.

En la literatura sólo se enuncian criterios empíricos sobre la zona de empotramiento en lo relacionado con su longitud, que equivale a dos veces el diámetro y el espesor que es la suma de las secciones. Al analizar los datos se encuentra una geometría viable en términos de rigidez y resistencia con una relación diámetro – longitud de 3.6 veces y un espesor equivalente a lo indicado anteriormente.

Palabras clave: poste, Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, PRFV, materiales compuestos, fibra de vidrio, redes aéreas, poste seccionado de energía, elementos finitos.

1. Introducción

1.1. Postes en fibra de vidrio para redes eléctricas

El uso de estructuras de soporte para redes eléctricas en Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) no es nuevo, de acuerdo con existen casos de éxito documentados desde mediados de los años 60 [1]. Por más de 45 años han evolucionado mejorando sus atributos y actualmente sus características únicas tales como: alta relación resistencia mecánica-peso, adecuado desempeño en ambientes altamente corrosivos, así como bajo costo de transporte, instalación y mantenimiento los han convertido en una opción viable para fabricar postes de transmisión de energía eléctrica como reemplazo de materiales que convencionalmente se han usado para este propósito, como madera, concreto y acero [2].

Adicional a sus características superiores, su uso se ha generalizado, debido a que estos atributos anteriormente mencionados pueden ser personalizados y diseñados para satisfacer condiciones específicas de operación que son críticas o inviables con materiales sustitutos, tales como: zonas costeras donde la salinidad y humedad generan degradación acelerada o regiones de temperaturas extremas y fluctuantes, ya sean altas que limitan la capacidad portante o bajas que fragilizan y cristalizan reduciendo la capacidad portante ante cargas dinámicas [3].

Los postes para transmisión y distribución de energía son comúnmente tronco cónico y de pared delgada, sometidos principalmente a flexión en cantiléver debido a la presión del viento, las cuerdas de amarre y la tensión de los cables conductores, tal como se ilustra en Figura 1 y Figura 2.

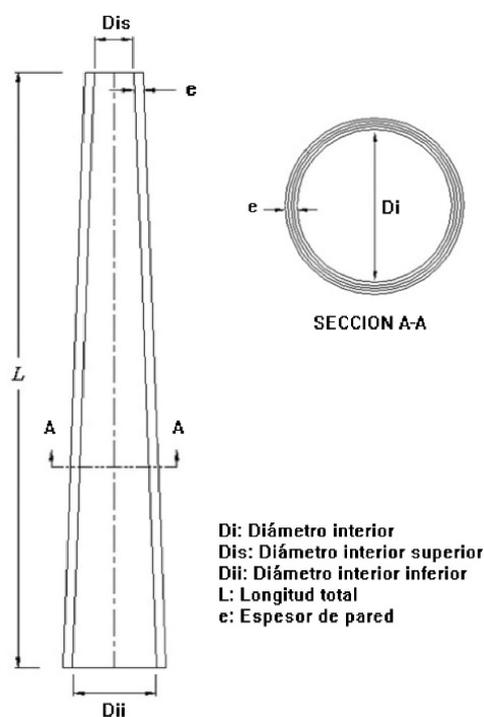


Figura 1. Esquema de poste tronco cónico de pared delgada [elaboración propia]



Figura 2. Aplicaciones y uso de postes monolíticos [18]

Igualmente, el proceso más común de fabricación de estas estructuras en PRFV es enrollamiento de hilos de refuerzo como son las fibras de vidrio tipo E o ECR y con matriz polimérica de poliéster insaturado [3].

1.2. Postes seccionados

Los postes en PRFV al ser comparados con los de madera, acero y concreto, presentan ventajas importantes como fácil instalación, alta resistencia, acabado superficial uniforme, altas propiedades de aislamiento eléctrico [7]. Aunado a ello, debido a restricciones de manufactura y facilidad de transporte superior, ha crecido la necesidad de diseñar y fabricar postes en secciones independientes que posteriormente son ensambladas en campo [13], como se muestra en Figura 3.



Figura 3. Aplicaciones y usos de postes seccionados [16]

Si bien se ha hecho un esfuerzo importante reciente para estandarizar y normalizar el uso de postes en PRFV [1][19], no se describe de manera explícita una metodología de diseño o prácticas recomendadas para el dimensionamiento de la zona de unión o ensamble.

En [5] se muestra un modelo de elementos finitos para el análisis dinámico de un poste de PRFV que consisten en dos cuerpos troncocónicos de pared delgada los cuales se unen de una manera semirrígida por medio de una junta química, no obstante, la práctica actual consiste en uniones por ajuste sin ningún tipo unión adicional lo cual hace más simple, económico y práctico su transporte e instalación.

La técnica mencionada anteriormente, es el único método patentado que se encuentra en [20], presenta un poste en PRFV capaz de soportar líneas aéreas de energía, telecomunicaciones e iluminación pública. Consiste en porciones, con las dimensiones de tal manera, que pueden ser insertadas en los finales de cada una debido a que tienen la misma geometría y perímetro [13]; no obstante, este método es exclusivamente para piezas fabricadas por el proceso de pultrusión con la particularidad de ser de sección constante y cuerpos rectos.

Actualmente existen diversas compañías alrededor del mundo, que ofrecen esta solución, pero sin mayor referenciamiento técnico o de diseño.

2. Metodología

2.1. Objetivo del proyecto

Diseño por elementos finitos de una junta simple que no requiere uniones mecánicas, ni químicas, de modo que faciliten el ensamble de postes de PRFV seccionados.

2.2. Objetivos del diseño

Diseñar usando el método numérico de elementos finitos, empleando el software comercial ANSYS® R.15, la junta de unión de un poste troncocónico de 12 metros de longitud y 7350 N de resistencia a la falla por flexión, fabricado PRFV en secciones para ser ensamblado en el lugar de instalación final de uso, satisfaciendo los siguientes requerimientos:

- Los parámetros geométricos y desempeño mecánico, deben estar acorde con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE)[21].
- La unión debe ser por ajuste simple, sin elementos mecánicos de unión, ni medios químicos.
- La transición no debe generar concentradores de esfuerzo o singularidades mecánicas o geométricas que disminuyan el desempeño mecánico de la estructura de soporte.

2.3. Diseño poste monolítico

Debido a la complejidad con relación a: propiedades del material que varían lámina a lámina, secuencia de laminado o apilamiento, orientación de la fibra, geometría troncocónica y la combinación de estados de carga, los métodos analíticos convencionales no son adecuadas para brindar una solución efectiva y confiable, no obstante, los métodos numéricos han probado ser más eficientes. Entre los diferentes métodos numéricos, elementos finitos es uno de los más empleados debido a su alta eficiencia y confiabilidad; esto, combinados con la teoría multicapa de pared delgada puede ser empleada para determinar el estado de esfuerzos y deformaciones para el cálculo y diseño de postes en PRFV [4-1].

Existen diversos estudios sobre la metodología de diseño de postes y su estratificación, los cuales se usan de referencia para la configuración que será objeto de estudio. Se han realizado diferentes investigaciones y publicaciones acerca del diseño y de postes troncocónicos de pared delgada sometidos a diferentes estados de carga, en ellos se analiza su respuesta a múltiples condiciones de falla [7-12], por lo tanto, para el diseño específico de un poste será tomado como referencias los parámetros de [8] basado en la teoría de láminas de pared delgada como se presenta en [5].

2.4. Diseño de poste seccionado

Existen algunos estudios sobre métodos de unión y el diseño de la junta para postes seccionados en PRFV. La Universidad de Manitoba publicó una técnica de ensamble de secciones troncocónicas utilizando el traslape de elementos de unión en su longitud y adhesivo estructural epóxico que conforma la unión química [5]. Plantea un modelo cinemático de transferencia que consiste en

esfuerzos y deformaciones cortantes que permiten el flujo de carga entre secciones, el cual también es aplicable a juntas por ajuste. Igualmente, de acuerdo con lo expuesto en [13] el mecanismo de unión junta mecánica y unión adhesiva, permiten construir un modelo para la transferencia de esfuerzos es postes de PRFV.

Teniendo esto como antecedente los modelos expuestos en [5] y [13], en el presente, se estudia un método de unión similar al empleado para postes metálicos huecos, tomando como referente las patentes [14] y [15] en los que se presentan como juntas deslizables con las siguientes premisas:

- El refuerzo de los postes generado por el traslape en las terminaciones de las secciones, debe mejorar la resistencia y rigidez del ensamble final.
- Tomando en cuenta que, la resistencia de la junta deslizable debe ser por lo menos igual a el resto de la sección del poste, la longitud de la zona de ensamble debe ser por lo menos dos veces la distancia entre dos puntos opuestos de la sección transversal. De acuerdo con [17] esta longitud de traslape debe ser mínimo 1,5 veces el diámetro interior de la sección mayor de la unión.

2.5. Modelo geométrico

Para un poste referencia 12-750 (12 metros de longitud y 7350 N de carga de rotura) el cual se esquematiza en Figura 4.

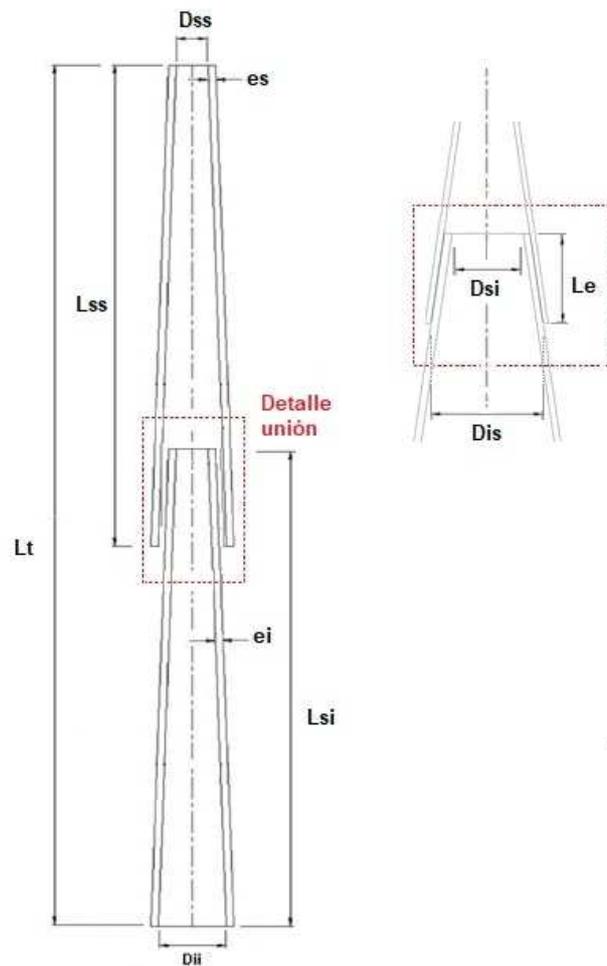


Figura 4. Esquema de postes seccionado [elaboración propia]

Para efectos de análisis y con el propósito de determinar la longitud de ensamble más eficiente se fijan las dimensiones que se muestran en Tabla 1.

Abreviatura	Dimensión	Magnitud
Lt	Longitud total	12.0 m
Lsi	Longitud sección inferior	6.0 m
Dii	Diámetro inferior sección inferior	0.4 m
Dsi	Diámetro superior sección inferior	0.4 m
ei	Espesor sección inferior	12.0 mm
es	Espesor sección superior	10.0 mm

Tabla 1. Dimensiones del estudio

Con el propósito de observar la incidencia de los parámetros geométricos, se construyeron cinco modelos virtuales (digitales) empleando diferentes relaciones de diámetro y longitud de ensamble de acuerdo con la Tabla 2.

Modelo	Le (m)	Dis (m)	Lss (m)	Le/Dis
01	0.30	0.1671	6.30	1,8
02	0.45	0.1681	6.45	2,7
03	0.60	0.1690	6.60	3,6
04	0.75	0.1700	6.75	4,4
05	0.90	0.1709	6.90	5,3

Tabla 2. Dimensiones de la sección superior para cada uno de los modelos

E igualmente para cada uno de los modelos enunciados en la Tabla 2 se simuló el desempeño de la estructura para espesores de 22 mm ($e_i + e_s$), 20 mm, 18 mm, 16 mm, 14 mm, 12 mm.

2.6. Propiedades del material

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de matriz polimérica son dependientes de las materias primas básicas y la relación entre ellas influenciado principalmente por el proceso de transformación [23]. Para el presente trabajo se tomaron de referencias los valores validados de estudios previos mostrados en [5], [6] y [25], los cuales se resumen en la Tabla 3.

Nomenclatura	Descripción	Magnitud
E_r	Módulo de tensión resina	3.58 GPa
E_f	Módulo de tensión fibra	72.4 GPa
ν_{12}	Relación de Poisson resina	0.30 [adimensional]
ν_{12}	Relación de Poisson fibra	0.20 [adimensional]
G_r	Módulo de rigidez a cortante resina	1.38 [adimensional]
G_f	Módulo de rigidez a cortante fibra	30.00 GPa
ρ_f	Densidad fibra	2.54 g/cm ³
ρ_r	Densidad resina	1.08 g/cm ³
E_1	Módulo de tensión longitudinal	48.00 GPa
E_2	Módulo de tensión transversal	13.30 GPa
G_{12}	Módulo de rigidez interlaminar	5.17 GPa
ν_{12}	Relación de Poisson	0.235 [adimensional]
ρ_c	Densidad del compuesto	1.87 g/cm ³

Tabla 3. Propiedades de los materiales constitutivos y del laminado de compuesto

2.7. Modelo numérico

Para el modelo de elementos finitos se emplea un elemento tipo SHELL131 de 4 nodos y 6 grados de libertad [24] el cual se ilustra en la Figura 5, tomado como referencia [8] y [9] en el que se muestran modelos reproducibles, se elige un laminado antisimétrico +10/-10, con las propiedades mecánicas que de la Tabla 3.

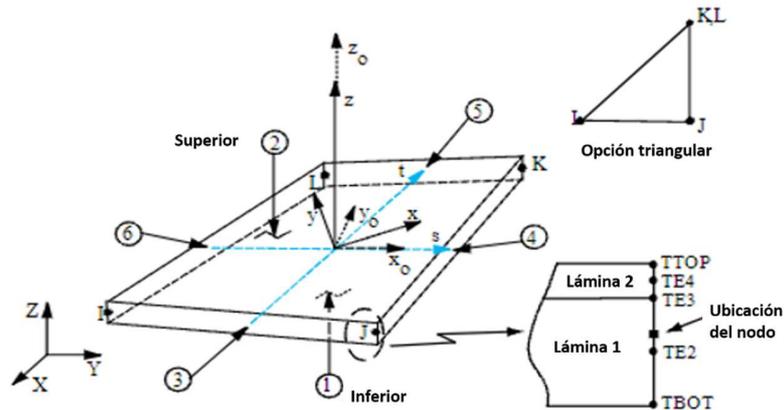


Figura 5. Geometría de elemento SHELL131 [24]

Empleando la geometría de Figura 4 se construyen las 31 combinaciones que corresponden a la variación geométrica en cuanto a Dis y Le, las cuales se ilustra en Figura 6.

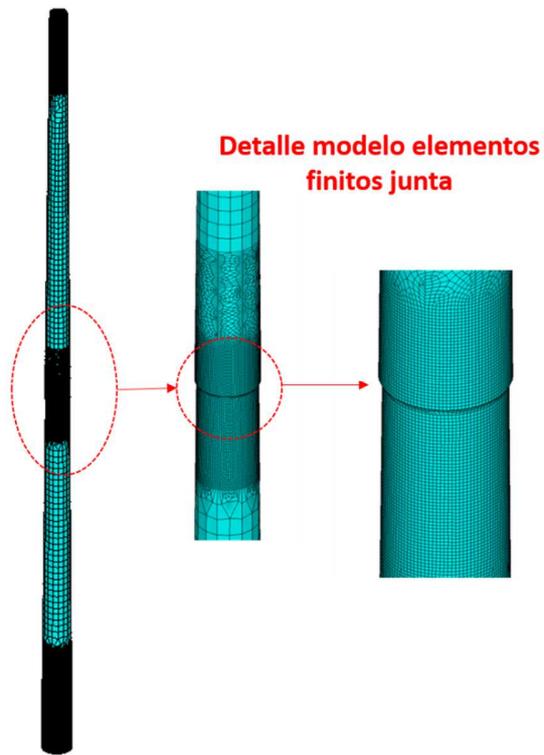


Figura 6. Modelo de elementos finitos del poste seccionado

Las condiciones de frontera son iguales para todos los modelos de acuerdo con lo que establece [21] para un poste 12-750 y se esquematiza en Figura 7.

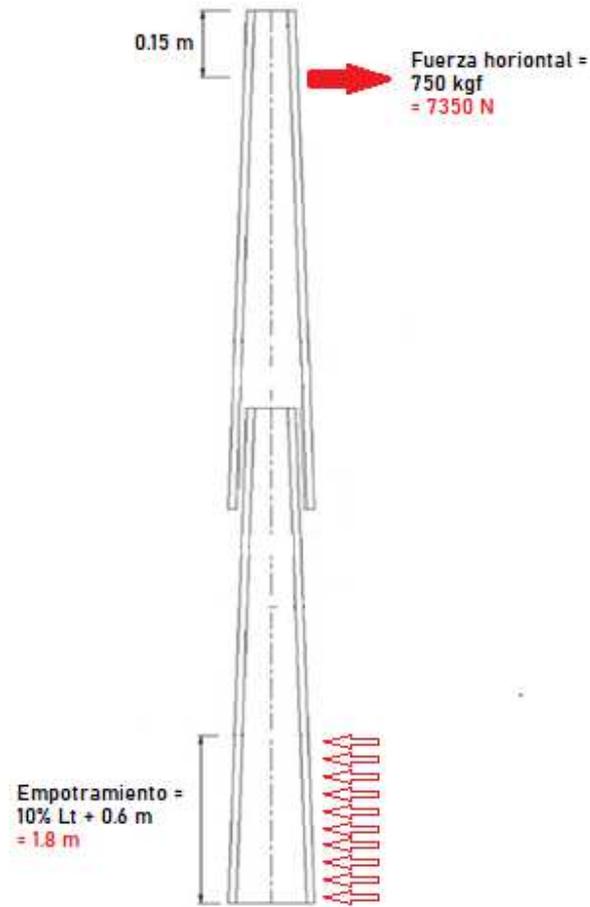


Figura 7. Condiciones de frontera del estudio

3. Resultados y discusión

En cada uno de los modelos enunciados en Tabla 1 y Tabla 2 se determinan las siguientes variables de la junta:

D.máx = magnitud máxima de la suma de las deformaciones presentada en el modelo.

Esf.máx = magnitud máxima del valor absoluto bajo de modelo de esfuerzo de von Mises presentada en el modelo.

Peso = resultado del cálculo del volumen del modelo x densidad del material (ρ_c).

Para el cálculo del peso se utiliza el modelo teórico de regla de mezclas [22], a partir de propiedades de la resina, fibra de vidrio y porcentajes de materiales [23]. El detalle de los resultados se muestra en el ANEXO I.

Para un mismo espesor de junta, a continuación, se muestra el comportamiento de las diferentes variables y magnitudes para todos los modelos.

3.1. Variación del peso

Efectivamente el aumento del volumen y en consecuencia el peso total del poste ensamblado es consistente a medida que se incrementa el área de unión, creciendo los diámetros de la sección superior y la longitud total, ver Figura 8.

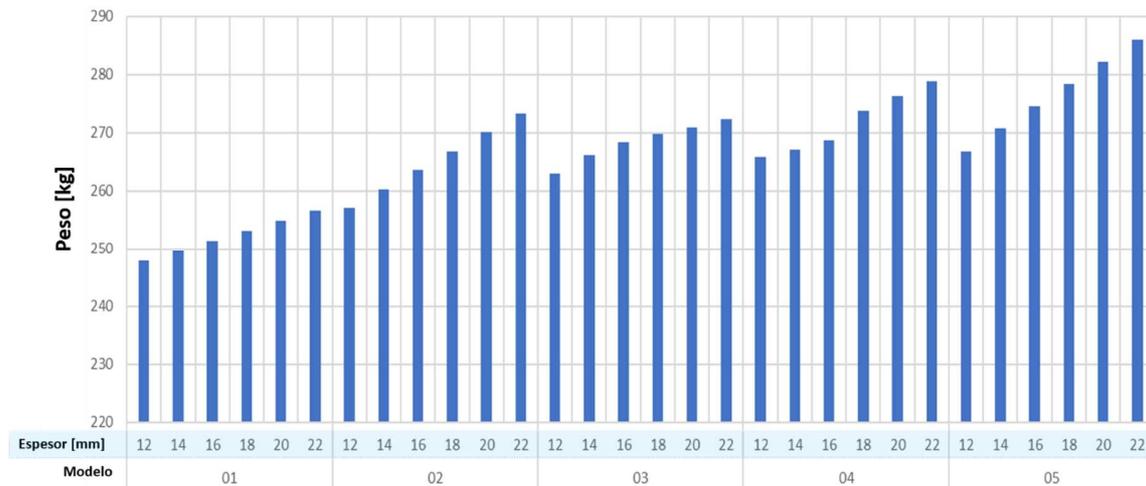


Figura 8. Peso de cada modelo y la variación de acuerdo con el espesor [kg]

El aumento de peso para un mismo modelo a diferentes espesores es completamente lineal y proporcional con una razón promedio de 1.0% por cada 2 mm adicionales en la unión.

Al comparar un mismo espesor en diferentes modelos (Figura 9), se encuentra que la ganancia de peso es más pronunciada en rango $6.3 \text{ m} < L_{ss} < 6.45 \text{ m}$ (promedio 5,1%), no obstante, para de $6.45 < L_{ss} < 6.9 \text{ m}$ es prácticamente inapreciable (promedio 1.3%).

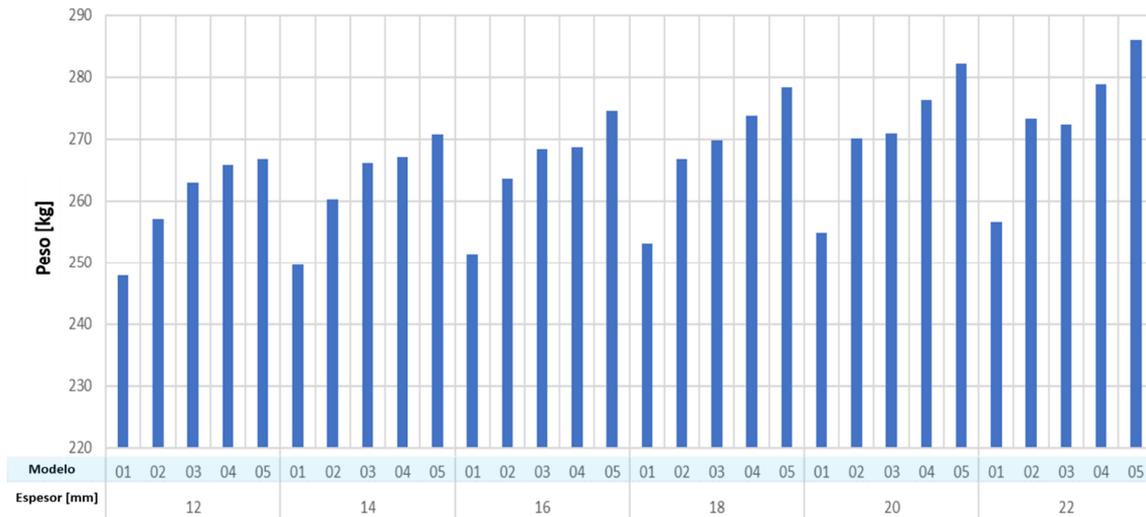


Figura 9. Peso para cada espesor determinado y la variación por modelo [kg]

3.2. Variación deflexión máxima.

Los modelos presentaron una distribución de la magnitud del desplazamiento absoluto, similar a la presentada en la Figura 10.

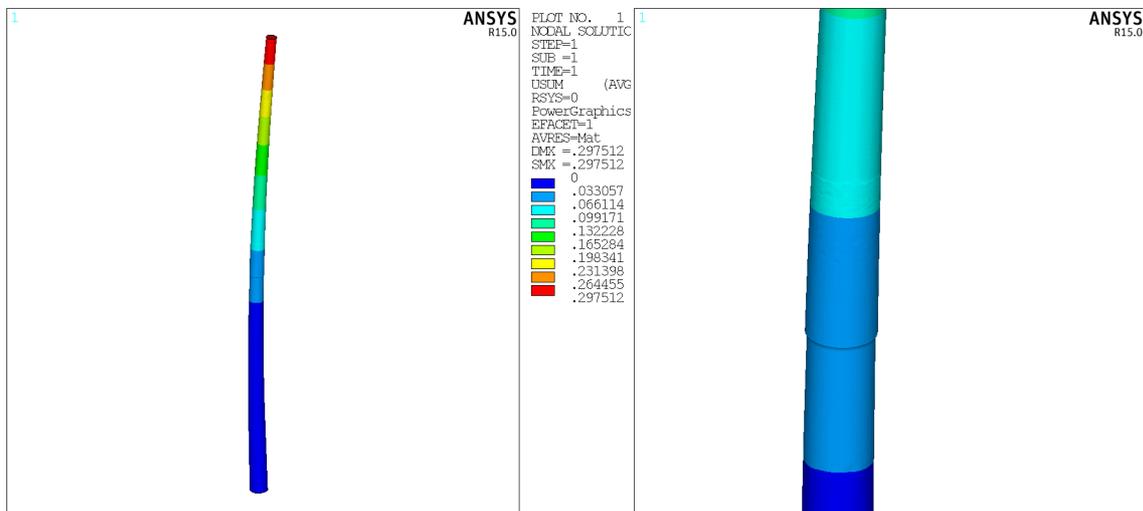


Figura 10. Distribución de la magnitud del desplazamiento absoluto [m]

El resultado de cada una de las simulaciones se muestra de manera comparativa en Figura 11.

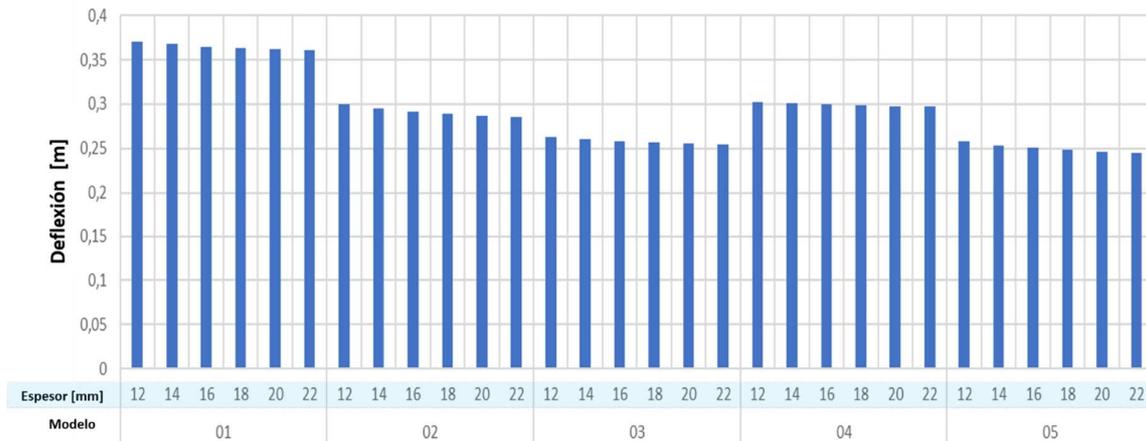


Figura 11. suma de la deflexión presentada en cada modelo [m]

En general se observa que la deflexión en el poste ensamblado depende directamente de la geometría de la sección y la longitud de ensamble, más no del espesor de la junta.

3.3. Variación del esfuerzo máximo

Como regla general se observa que al aumentar el espesor de la junta de unión disminuye el esfuerzo máximo. No obstante, no presenta un comportamiento lineal o proporcional entre estas magnitudes por lo cual puede inferirse que el desempeño estructural con relación a su resistencia es particular de cada configuración de acuerdo con lo presentado en la Figura 12.

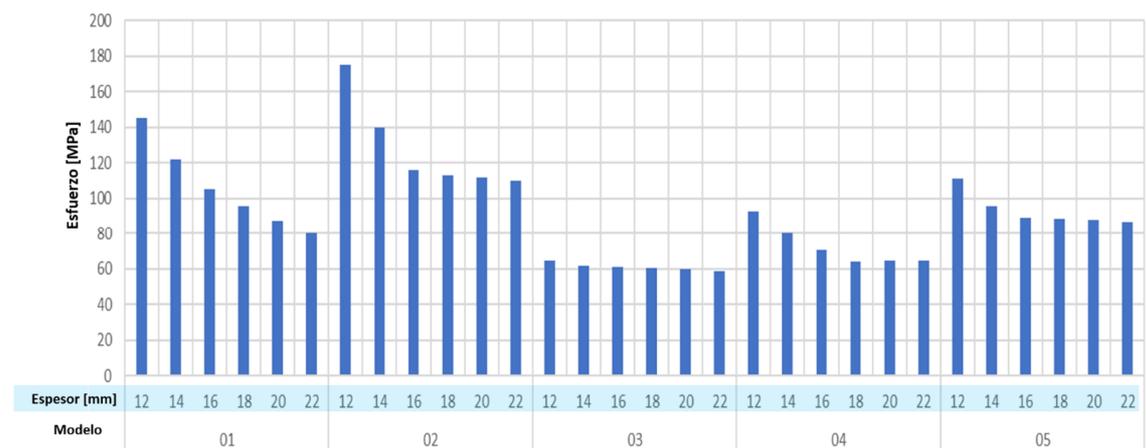


Figura 12. Esfuerzo máximo de cada modelo [MPa]

Los modelos 01 y 02 evidencian distribuciones de esfuerzos similares (Figura 13) y en general para los espesores 12, 14 y 16 el rango $0,30 \text{ m} < L_e < 0,45 \text{ m}$ generan mayor dependencia al espesor de esta a la magnitud del esfuerzo. Para rangos mayores la variación del esfuerzo es prácticamente nula. Esto indica que la capacidad de la junta en longitudes sobre los 0,60 m está comandada por esta variable, independiente del espesor.

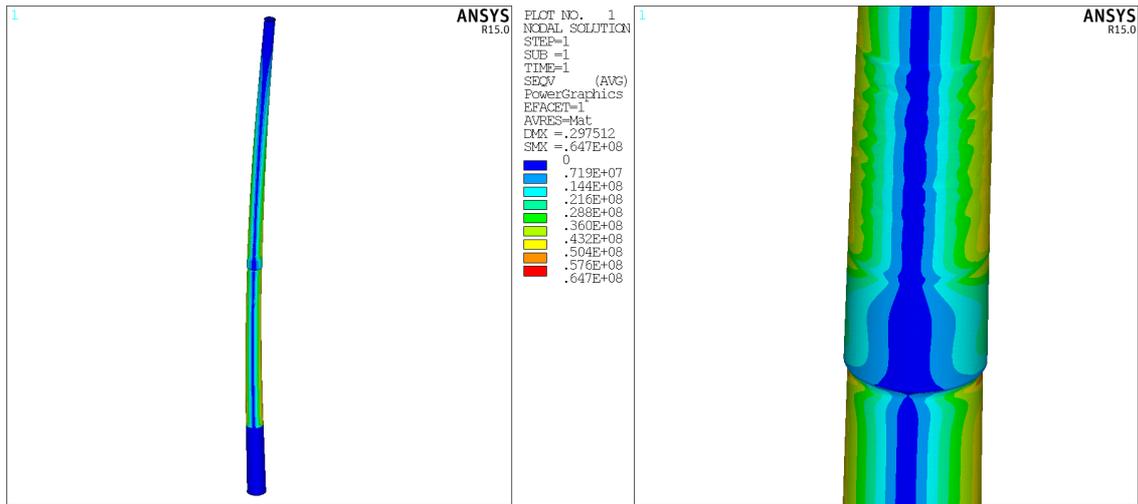


Figura 13. Distribución de esfuerzos de referencia para los modelos 1 y 2 [Pa]

En los modelos 03, 04 y 05 la distribución es diferente y exige mecánicamente a cada sección, tal como se muestra en la Figura 14, donde la magnitud mayor (color rojo) se presenta en ambas partes.

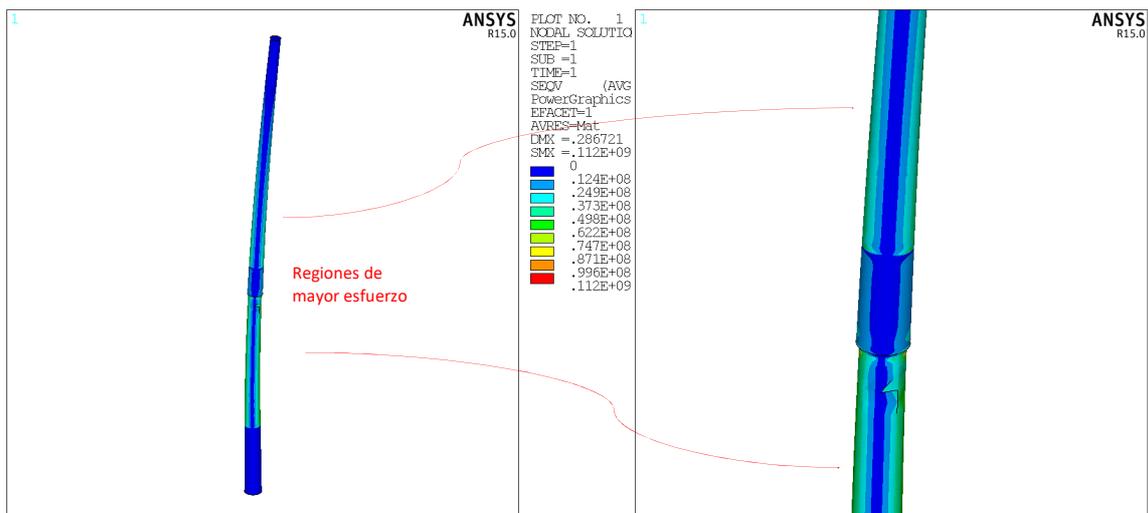


Figura 14. Distribución de esfuerzos de referencia para los modelos 3 al 5 [Pa]

3.4. Modelo de poste seccionado

Partiendo de la premisa inicial de tener el poste logísticamente más viable en términos de peso y longitud, se analiza la relación entre el peso total y la deflexión o el esfuerzo, la cual se muestra en la Figura 15.

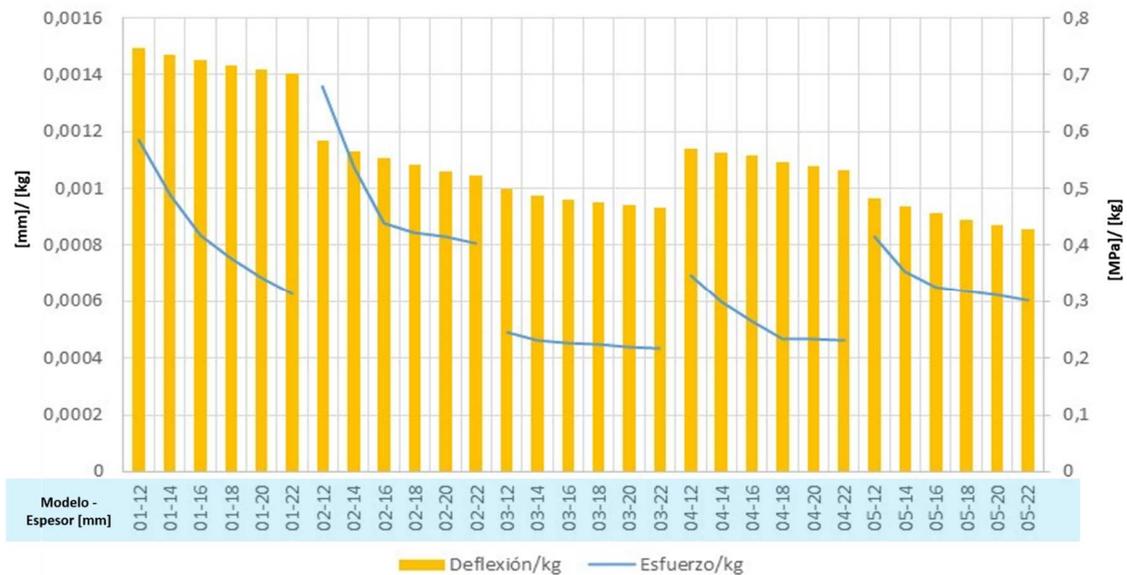


Figura 15. Relación esfuerzo/peso y deformación/peso

En este orden de ideas, la mejor combinación en términos de eficiencia de peso se obtiene con el modelo 03 de 22 mm en espesor de junta.

4. Conclusiones

En este proyecto se analizaron, usando el método de elementos finitos, 30 modelos geométricos diferentes de un poste seccionado típico normalizado. Se variaron los parámetros geométricos críticos para el desempeño estructural, buscando la mejor combinación deflexión/peso y esfuerzo/peso estableciendo cuál es la configuración que utiliza de mejor manera la masa necesaria para construir el elemento estructural. En este caso como se mencionó anteriormente corresponde al modelo 03 de 22 mm de espesor en la junta de unión debido a que presenta sólo 1.06 mm de deflexión y 231.96 kPa de esfuerzo, lo cual significa un 1.0% y 2.0% respecto al siguiente valor óptimo que es el 3 de 20 mm. La geometría de máxima deflexión corresponde al 1 de 12 mm y presenta una magnitud mayor 60.36%. El mayor esfuerzo es 214.83% más y se presenta en el 02 de 12mm.

Para el diseño se tuvo en cuenta las condiciones de norma colombiana para un poste de 12.0 m con 7.350 N a la vez los parámetros geométricos permitidos en cuanto diámetros, conicidad y longitud de empotramiento.

De acuerdo con el análisis de rigidez (desplazamientos) la deflexión máxima que alcanzaría un poste a ser sometido a flexión depende más de la longitud de ensamble y diámetros de la zona de unión que del espesor de esa región.

Según el análisis de esfuerzos, la resistencia de la estructura es altamente sensible al espesor de la junta más que de la longitud de la sección, no obstante, se encontró que en el modelo 03 se presenta mejor estabilidad de la estructura con la menor magnitud al desplazar el máximo esfuerzo hacia cada sección, aprovechando mejor la capacidad estructural.

Como paso adicional se sugiere validar un modelo a escala real que pueda ser fabricado reproduciendo los parámetros de manufactura como orientación de refuerzo, espesores, así como las variables geométricas de cada sección y garantizar las condiciones de ensamble que permitan reproducir el comportamiento mecánico de la junta.

5. Referencias

[1] American Society of Civil Engineers (2019). ASCE MANUAL OF PRACTICE NO. 104, Recommended Practice for Fiber-Reinforced Polymer Products for Overhead Utility Line Structures. Segunda edición. ISBN: 9780784415443, 9780784482568.

[2] B. Saboori a,n, S.M.R.Khalili (2010). Static analysis of tapered FRP transmission poles using finite element method.

[3] D. Polyzois, I.G. Raftoyiannis, S. Ibrahim (1998), Finite elements method for the dynamic analysis of tapered composite poles, Compos. Struct. J.

[4] D.R. Navaratna, T.H.H. Pian, E.A. Wittmer (1968). Stability analysis of shell of revolution by the finite-element method, AIAA J. 6.

[5] Ioannis G. Raftoyiannis, Dimos J. Polyzois (2007). The effect of semi-rigid connections on the dynamic behavior of tapered composite GFRP poles, Composite Structures, Volume 81, Issue 1, ISSN 0263-8223.

[6] Girum Urgessa, Sara Mohamadi. Assessment of Fiber-reinforced Polymer Composite Electric Poles. International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction Structural. Mason University, 4400 University Dr MS 6C1, Fairfax, VA, 22030

[7] Fouad, H.F. and Mullinax, Jr., E.C. (2010). FRC poles for distribution power lines. Advanced Technology in Structural Engineering, American Society of Civil Engineers.

[8] Ibrahim S, Polyzois D. Ovalization analysis of fiber reinforced poles (1999). Journal of Composite Material.

[9] Polyzois D, Ibrahim S, Raftoyiannis IG (1999). Performance of fiber reinforced plastic tapered poles under lateral loading. Journal of Composite Material.

- [10] Polyzois D, Ibrahim S, Raftoyiannis IG. Performance of fiberreinforced plastic tapered poles under lateral loading. *J Compos Mater* 1999;33(10):941–60.
- [11] Lin ZM, Polyzois D, Shah AH (1998). Non-linear analysis of fiber in forced plastic poles. *Structrutral Engineering Mechanical*.
- [12] Amir Fam a, Yail J. Kim b, Je-Kuk Son (2010). A numerical investigation into the response of free end tubular composite poles subjected to axial and lateral load, Department of Civil Engineering, Queen’s University, Kingston, ON, Canada, Department of Civil Engineering, North Dakota State University, Fargo, ND, USA.
- [13] Panagiotis, Chronis (2018). Modular fiber reinforced plastic poles. Patente: 2018/0016807A1. United Stated Patent Office.
- [14] Kaichiro, Okuto. Toshio, Kai (1975). Modular fiber reinforced plastic poles. Patente: 3865498. United Stated Patent Office.
- [15] Misberger, Raymond F (1975). Tubular pole slip joint construction. Patente: 3936206. United Stated Patent Office.
- [16] Postes modulares de alto desempeño. Disponible en <https://www.rspoles.com/sites/default/files/resources/rs-poles-brochure-spanish-v4.3.pdf>
- [17] American Society of Civil Engineers (2011). Design of Steel Transmission Pole Structures ASCE ASCE/SEI 48-11Book set: ASCE 48ISBN (print): 978-0-7844-1181-0ISBN (PDF): 978-0-7844-7640-6
- [18] Composite Transmission and Distribution Products. Shakespeare Composite Structures. Disponible en <https://www.skp-cs.com/products/utility-poles-and-accessories/t-d-poles>
- [19] American Composite Manufacturer Asociation (2018). Standard Specification for FRP Composite Utility Poles. ACMA/UCSC - FRP Composite Utility Poles - UP01-18.
- [20] United States Patent and Trademark Office. <https://www.uspto.gov/>
- [21] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (2013). RESOLUCIÓN 90708 DE 2013 (agosto 30). Diario Oficial No. 48.904 de 5 de septiembre de 2013. Por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE.
- [22] MIRAVETE, Antonio. *Materiales Compuestos I* (2000). Primera edición. Publicado por INO Reproducciones S.A. Zaragoza. España. ISBN 84 921349 7 6.
- [23] ULLOD, José. ANTEQUERA, Pablo. MIRAVETE, Antonio. JIMÉNEZ, Lorenzo (1994). *Procesos de transformación de la fibra de vidrio*. Editorial Vetrotex España S.A. Zaragoza. España. ISBN 84 604 9944 8
- [24] ANSYS 15.0 RELEASE DOCUMENTATION. SAS IP, Inc.
- [25] Ibrahim SM (2000). Performance evaluation of fibre-reinforced polymer poles for transmission lines, Ph.D. thesis, The University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada.

ANEXO I. RESULTADOS DE CADA UNO DE LOS MODELOS ANALIZADOS

Modelo	Volumen (m3)	Peso (kg)	Espesor junta (mm)	D.máx (m)	Esf.máx (m)
01	0,1372	257	22	0,3605	80,4
01	0,1363	255	20	0,3616	87,2
01	0,1354	253	18	0,3630	95,5
01	0,1344	251	16	0,3649	105,0
01	0,1335	250	14	0,3674	122,0
01	0,1326	248	12	0,3709	145,0
02	0,1462	273	22	0,2852	110,0
02	0,1444	270	20	0,2867	112,0
02	0,1427	267	18	0,2886	113,0
02	0,1410	264	16	0,2913	116,0
02	0,1392	260	14	0,2949	140,0
02	0,1375	257	12	0,3001	175,0
03	0,1457	272	22	0,2542	58,9
03	0,1449	271	20	0,2552	59,7
03	0,1443	270	18	0,2564	60,5
03	0,1436	268	16	0,2580	61,1
03	0,1424	266	14	0,2600	61,5
03	0,1407	263	12	0,2629	64,6
04	0,1492	279	22	0,2975	64,7
04	0,1478	276	20	0,2981	64,4
04	0,1464	274	18	0,2988	63,7
04	0,1437	269	16	0,2997	70,7
04	0,1428	267	14	0,3010	79,9
04	0,1421	266	12	0,3028	92,5
05	0,1529	286	22	0,2447	86,6
05	0,1509	282	20	0,2462	87,8
05	0,1488	278	18	0,2480	88,7
05	0,1468	275	16	0,2504	89,1
05	0,1448	271	14	0,2535	95,5
05	0,1427	267	12	0,2577	111,0