

Desempeño de uniones de acero embebido en material compuesto en la industria eólica: estudio numérico – experimental

Performance of Embedded Steel Bolted Joints in Composite Materials for the Wind Energy Sector: A Numerical–Experimental Study

Giovanni Vidal Flores¹, Jose Rafael Gomez Bautista², Rony Jimenez Alcazar³

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A

El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500

*giovanni.vidal@ciateq.mx¹, jose.gomez@ciateq.mx², rony.jimenez@ciateq.mx³

Resumen

Se presenta la metodología para la caracterización de una unión atornillada metálica embebida en material compuesto que representa al molde de un asa de 30 m de longitud para un aerogenerador de eje horizontal 1.2 MW. Estas uniones atornilladas embebidas son el medio de transferencia de carga entre el molde y la estructura metálica (junta placa de acero – material compuesto) cuando se realizan operaciones de volteo y ensamble de las conchas lado presión y lado succión de un asa de 30 m. El resultado de análisis numérico a tensión muestra un desplazamiento de la placa embebida de 0.68 mm mientras que en el ensayo experimental se observa un desplazamiento de 0.79 mm lo que representa una diferencia del 13.9 %. Para el caso de carga a cortante se obtiene un valor numérico de 0.98 mm, y en el ensayo experimental a cortante el valor promedio es de 1.1 mm lo que representa una diferencia del 10.9 %. Los valores de carga objetivo para tensión y para cortante demuestran que el espécimen embebido con 3 capas de fibra de vidrio biaxiales, el uso de adhesivo tipo Epikure MGS BPH 137G entre la placa embebida y la superficie del compuesto, y el uso de un tornillo de 1-1/4” resisten las cargas de prueba y que a tensión el modelo es capaz de soportar hasta 3.2 toneladas de carga antes del fallo de las fibras de vidrio, mientras que en cortante el valor se incrementa hasta 8 toneladas de carga antes de que se presente el fallo de las fibras de vidrio.

Abstract

This work presents the methodology for the characterization of a bolted metallic joint embedded in composite material, representative of the mold of a 30-meter-long blade for a 1.2 MW horizontal-axis wind turbine. These embedded bolted joints serve as the load transfer mechanism between the mold and the metallic structure (steel plate–composite joint) during flipping and assembly operations of the pressure side and suction side shells of the 30-meter blade. The numerical tensile analysis shows a displacement of the embedded plate of 0.68 mm, while the experimental tensile test shows a displacement of 0.79 mm, representing a 13.9% difference. For shear loading, the numerical result is 0.98 mm, and the average experimental shear displacement is 1.1 mm, corresponding to a 10.9% difference. The target load values for both tension and shear demonstrate that the embedded specimen—consisting of three layers of biaxial fiberglass, an Epikure MGS BPH 137G adhesive between the embedded plate and the composite surface, and a 1-1/4” bolt—is capable of withstanding the test loads. Under tensile loading, the model sustains up to 3.2 tons before fiberglass failure, while under shear loading, the capacity increases to 8 tons before fiber failure occurs.

Palabras clave:

Placa de acero embebida; unión metal-compuesto; molde de asa; ACP; Análisis numérico - experimental

Keywords:

Embedded steel plate, metal-composite joint, wind turbine blade mold, ACP

Introducción

En la actualidad, los materiales metálicos convencionales han sido reemplazados por materiales compuestos, ya que estos últimos poseen propiedades superiores a las de los materiales metálicos como peso ligero, mayor relación resistencia – peso, alta resistencia a la tracción, bajo coste, mayor flexibilidad de diseño, mejor resistencia a la fatiga, renovabilidad y biodegradabilidad [1]. Los materiales compuestos de matriz metálica (MCM) han ganado protagonismo en las industrias automotriz y aeroespacial debido a sus propiedades superiores permitiendo generar estructuras y aleaciones mucho más ligeras. Esto genera una amplia gama de posibi-

lidades para adaptar la respuesta de la estructura de la forma deseada [2].

Además, los nuevos sistemas de materiales que se desarrollan continuamente brindan infinitas posibilidades para el diseño estructural. Los materiales compuestos reforzados con fibra se utilizan cada vez más para unir materiales compuestos a otros materiales compuestos o a metales [3].

Sin embargo, a pesar de estas propiedades tan atractivas, es raro que un sistema de Plástico Reforzado con Fibra de vidrio

[Doi:10.59920/RIMTD.2025S1A2](https://doi.org/10.59920/RIMTD.2025S1A2)

MARZO 2025, VOL. 8

(FRP) se utilice como una entidad única y es mucho más común que sea un componente unido a otros materiales, como metales, donde se requieren otras características como resistencia isotrópica, tolerancia térmica, resistencia al desgaste, etc. Es el proceso de unión de FRP y metales el que puede resultar complicado si se quiere lograr una transición fluida de propiedades. Tradicionalmente, ha habido una tendencia a utilizar métodos de unión convencionales siempre que sea posible; los más comunes son la fijación mecánica o la unión adhesiva [4].

Aunque estos métodos “tradicionales” se utilizan ampliamente en toda la industria, sufren desventajas bien documentadas de daño a la fibra y áreas localizadas de alto estrés (debido a la necesidad de crear agujeros y transportar carga a través de ellos) o al depender de la integridad de la superficie y la resistencia interlaminar de la resina compuesta, en el caso de la unión adhesiva [4].

Existe muy poca o nula información acerca de los análisis numéricos y sobre todo los ensayos experimentales para verificar la resistencia de uniones embebidas entre acero y material compuesto con aplicaciones prácticas específicas para la industria eólica, concretamente para la unión de los moldes de fibra de vidrio con la estructura metálica de soporte [5], [6], [7], [8].

La caracterización de los materiales compuestos y su comportamiento mecánico ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones que involucran combinaciones de fibra y metal, aunque sus aplicaciones son generalizadas para distintas industrias y en las cuales buscan mejorar su diseño basándose en simulaciones numéricas combinadas con resultados de pruebas [9].

Los estudios han investigado compuestos híbridos que combinan diferentes tipos de refuerzos de fibras, como fibra de vidrio con fibras naturales o fibra de carbono con fibras aramida, mostrando propiedades mecánicas mejoradas en comparación de otros materiales convencionales. Estos avances continúan impulsando la investigación y el desarrollo en diferentes sectores de la industria.

Este estudio presenta una metodología de validación del diseño de uniones embebidas mediante análisis numérico utilizando el software ANSYS ACP para materiales compuestos, y el ensayo con carga estática a tensión y a cortante de la unión embebida. La aplicación de esta metodología es específica de la industria eólica y se puede utilizar como referencia para el análisis numérico de uniones acero – compuesto en otras industrias.

Objetivo

El diseño de uniones embebidas, a través de puntos de fijación metálicos embebidos en material compuesto principalmente en los moldes de las medias conchas de aspas eólicas, es una parte crucial de los procesos de fabricación de aspas de grandes dimensiones ya que se encargan de soportar, en el caso más crítico, al peso de los moldes (lado presión o lado succión), más el peso de las medias conchas de las aspas.

Normalmente las aspas se fabrican en 2 partes: lado presión y lado succión (cada una con sus respectivos moldes), que posteriormente se manipulan para unirse con adhesivo estructural. Se requiere entonces caracterizar las propiedades mecánicas de la junta que soporta a estos moldes, tales como la resistencia y falla del sistema, lo que además dará como resultado confiabilidad en la manipulación del sistema.

Por lo tanto, se presentan en este artículo los resultados obtenidos de 2 casos de carga críticos de la placa embebida en los moldes de fabricación de un aspa de 30m: prueba de tensión y esfuerzo cortante.

Metodología

Para llevar a cabo la simulación numérica de los especímenes de placa embebida se utiliza el módulo ACP acoplado con el módulo *Static structural* de ANSYS, con el cual se puede simular el comportamiento de esfuerzos y deformaciones de las fibras de material compuesto para verificar los resultados esperados durante los ensayos experimentales.

Se presentan primeramente los casos de carga a tensión y a cortante, los cuales servirán de condiciones iniciales tanto para el modelo virtual como para las pruebas físicas. Se genera un modelo CAD con la geometría suficientemente detallada para reproducir el fenómeno. Posteriormente, se crea el espécimen con fibra de vidrio y resina epóxica, se embebe la placa metálica sobre un cupón que representa al molde lado succión (LS) y se realizan pruebas de tensión y esfuerzo cortante en una maquina universal de ensayos donde se obtienen curvas de esfuerzo – desplazamiento para finalmente correlacionarlas con los resultados numéricos.

Descripción de Caso de carga a Tensión

El caso de carga crítica para la prueba a tensión en la placa embebida sucede cuando se realiza el procedimiento de volteo del molde y media concha del aspa de 30 m lado succión (lado del molde más pesado), ver Figura 1.

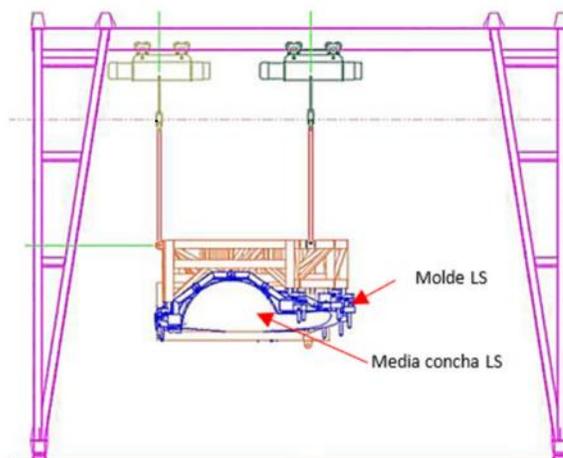


Figura 1. Volteo de molde LS a 0°.

La media concha del lado succión (LS) del aspa de 30m es más pesada que la media concha lado presión (LP), por esta razón es la que se toma en cuenta para el análisis del caso de carga. El momento crítico es exactamente cuando el conjunto molde y media concha son izados por 3 “gantries” y pierden contacto con el suelo a 0°.

La media concha LS pesa 2,112 kg y la zona más pesada es en la raíz de la concha con 538.24 kg. Así mismo, el molde LS pesa 1,747 kg y en la zona de la raíz pesa 109 kg. En la zona de la raíz se considera el uso de 10 placas embebidas, de tal forma que el peso que soporta cada placa en esta sección de la raíz del aspa es como sigue:

$$F_T = \frac{(538.24kg + 109kg)(9.81 m / s^2)}{10} = 634 N$$

Estos valores se utilizan para realizar un análisis FEM y determinar la reacción en el nodo más cargado entre la unión de la placa embebida y el molde LS en la condición de volteo del molde a 0°. En la Figura 2 se muestra el resultado de este análisis FEM previo y que solo se muestra para fines ilustrativos.

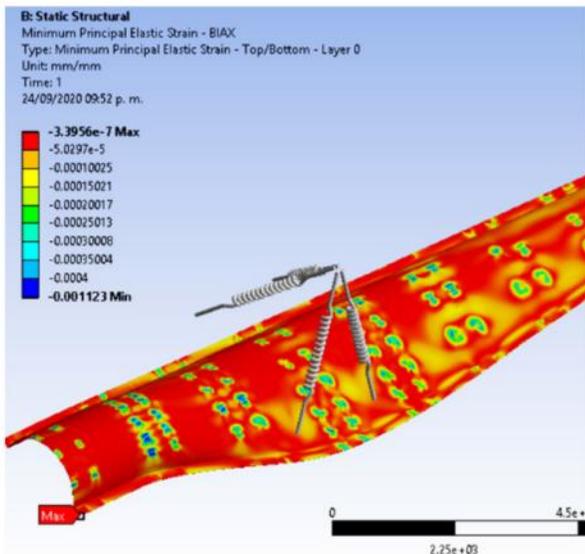


Figura 2. Determinación de reacciones en nodos entre placa embebida y molde LS a 0°.

Las reacciones en la placa embebida con el máximo valor se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Reacciones en placa embebida crítica sobre molde LS a 0°.

No.	Variable	X	Y	Z	TOTAL
1	Fuerzas (N)	-826.27	597.39	4,327.5	4,446.0
2	Momentos (Nm)	-49.28	-0.52	-42.32	64.95

El valor objetivo entonces, al cual se realizan las pruebas de tensión, es 4,327.5 N, y que numéricamente es un valor más confiable que la distribución de carga analítica a 0° justo antes de realizar la operación de volteo del molde LS.

Con estos valores, también es posible proponer el espesor de la placa embebida como 1/2” y el uso de un perno de unión de 1-1/4” de diámetro, suficientes para alcanzar un factor de seguridad en el compuesto de $FS_{composite} = 3$ y $FS_{perno} = 2.7$ en el tornillo.

Descripción de Caso de carga a Cortante

Un segundo caso de carga se da cuando se realiza el procedimiento de volteo del molde LS a 90° de inclinación, ver Figura 3.

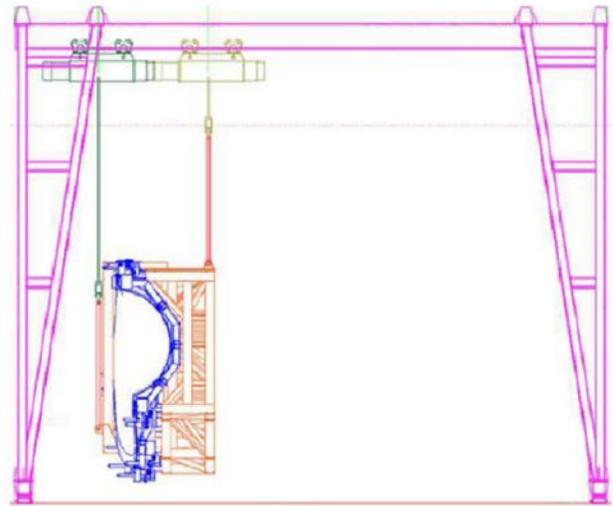


Figura 3. Volteo de molde LS a 90°.

Se utilizan los mismos valores analíticos del ejercicio a tensión para determinar las reacciones en los nodos de las placas embebidas con el molde LS a 90°. De la misma manera, se muestra en la Figura 4 el resultado del análisis FEM previo con fines ilustrativos solamente y del cual se obtuvieron las reacciones mostradas en la Tabla 2.



Figura 4. Análisis de estructura de molde LS para obtención de cargas a 90°.

Tabla 2. Reacciones en placa embebida crítica sobre molde LS a 90°.

No.	Variable	X	Y	Z	TOTAL
1	Fuerzas (N)	-6,004.9	352.29	182.07	6,018.0
2	Momentos (Nm)	7.66	-0.16	-78.10	78.47

Se deduce el valor objetivo para la prueba a cortante como 6,004.9 N, cuando el molde LS se encuentra a 90° de inclinación durante la operación de volteo.

Análisis numérico

Se describe a continuación la metodología para la realización del método numérico utilizando un análisis acoplado entre los módulos ACP de materiales compuestos y el módulo Static Structural para determinación de desplazamientos en ANSYS.

El modelo CAD requerido para el análisis numérico consta de 2 superficies para crear las capas de fibra de vidrio del molde lado succión (LS) y las fibras que embebe a la placa metálica al molde. Las superficies son la base para la creación de las capas en el módulo ACP de ANSYS, y el sólido simplificado, que representa la placa embebida y el tornillo de unión (sin cuerda), se usan en el módulo Static Structural para realizar la aplicación de las condiciones de carga iniciales, ver Figura 5.

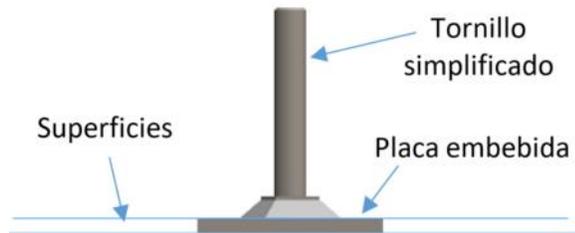


Figura 5. Modelo CAD simplificado.

En el módulo ACP se utiliza la superficie más baja para crear 12 capas de fibra de vidrio biaxiales de 0.65 mm. Estas capas representan al molde lado succión del molde del asa de 30m. Posteriormente, la superficie intermedia se utiliza para crear 3 capas de fibra de vidrio biaxiales que representan las capas que cubren a la placa metálica y conforman el embebido en el molde. El modelo creado en ANSYS ACP considera el relleno de los huecos entre las fibras BIAX y la placa metálica con resina epóxica con propiedades idénticas a las del adhesivo Epikure MGS BPH 137G (ver Figura 6).

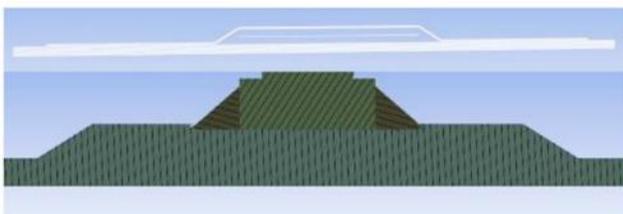


Figura 6. Acomodo de láminas de fibra de vidrio en ACP Ansys.

El modelo de capas de fibra creado en ACP se utiliza como geometría externa en el módulo Static Structural y se combina con el modelo sólido de la placa y el tornillo de fijación. Se crean los contactos entre fibra de vidrio y placa metálica como bonded debido al uso en físico del adhesivo Epikure y se hace un corte al perno de fijación que representa la zona de agarre de la mordaza en la máquina de ensayos universal para pruebas a tensión (ver Figura 7).

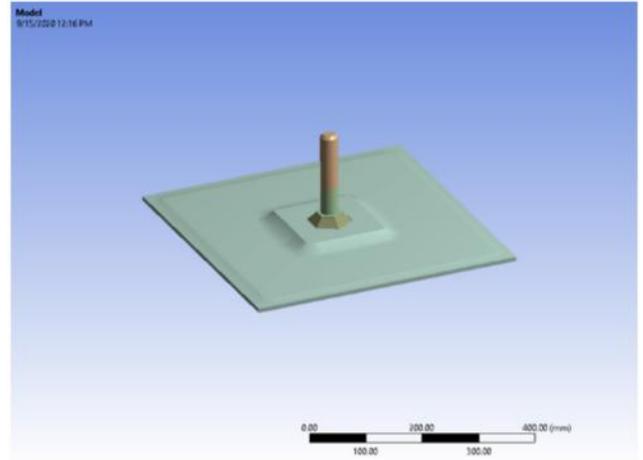


Figura 7. Modelo FEM para análisis de desplazamientos a tensión y a cortante.

El siguiente paso es determinar las condiciones de carga iniciales para el análisis a tensión y para el caso de carga a cortante.

Análisis de resultados del método numérico

Resultados del análisis numérico a Tensión

Evidentemente, se espera que durante la prueba de tensión suceda una separación de la fibra de vidrio de la placa base como se observa en la Figura 8.

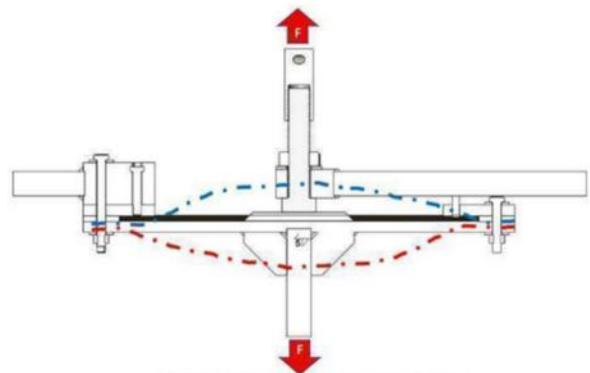


Figura 8. Deformación esperada del espécimen de fibra de vidrio.

Este efecto se analiza con el análisis numérico por el método de elementos finitos (FEM) simulando la carga de prueba

de 4,327.5 N en dirección perpendicular a la placa embebida para determinar el desplazamiento como se observa en la Figura 9.

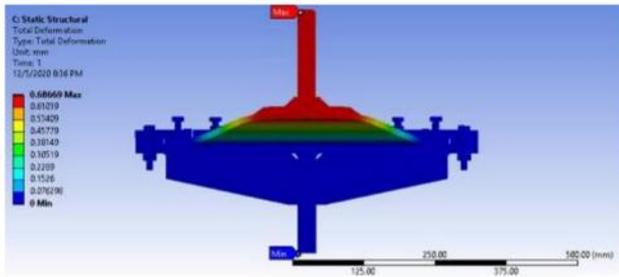


Figura 9. Resultado numérico de desplazamiento por esfuerzo a tensión en placa embebida.

El valor calculado de desplazamiento de la placa es de 0.68 mm y cuyo valor servirá de referencia contra el método experimental.

Resultados del análisis numérico a Cortante

De la misma manera, se analiza el modelo de placa embebida para el caso de carga a cortante. En este caso, se usa una carga paralela a la placa embebida de 6,004.9N colocada en el perno como se observa en la Figura 10.

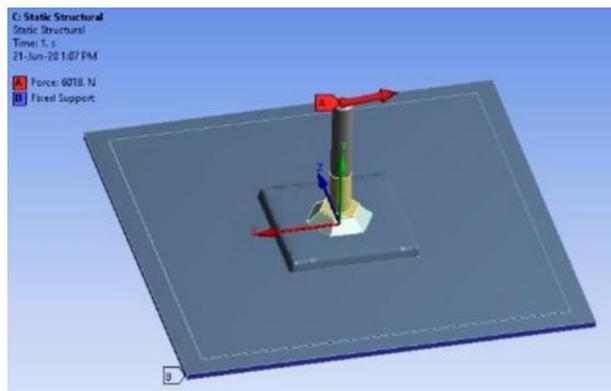


Figura 10. Condiciones de carga para análisis de desplazamientos a cortante.

En este caso, es más complicado determinar el punto de desplazamiento ya que la aplicación de la carga en el método experimental abarca la pared cilíndrica del perno y el desplazamiento esperado es angular. Por lo tanto, se toma como valor crítico el desplazamiento de los nodos en la periferia de la placa embebida y se hace mayor énfasis en las deformaciones de la fibra de vidrio. El valor permisible de deformación bajo condiciones extremas de acuerdo con la Norma IEC61400-2 es de 5078 $\mu\text{m}/\text{mm}$. El resultado del análisis FEM es de 1645 $\mu\text{m}/\text{mm}$ con la carga por lo que se obtiene un factor de seguridad de F.S.=3 (ver Figura 11). El desplazamiento resultante es de 0.98 mm.

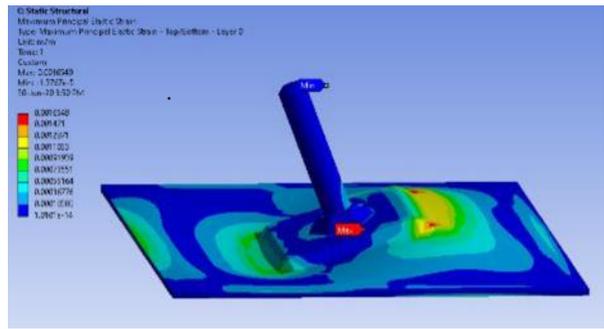


Figura 11. Resultado numérico de deformación de fibra de vidrio por esfuerzo a cortante en placa embebida.

Adicionalmente, se muestra el esfuerzo Von-Mises resultante en el ensamble para la parte metálica (ver Figura 12) con un valor de 195 MPa por lo que está por debajo del esfuerzo de cedencia del acero estructural A36 (250 MPa), ver Figura 12.

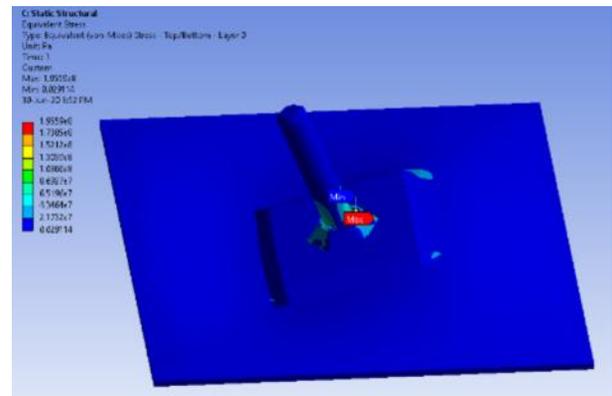


Figura 12. Resultado numérico de esfuerzos Von-Mises en placa embebida por esfuerzo a cortante.

El resultado del esfuerzo máximo se da en la zona de la soldadura del perno con la placa metálica como se observa en la Figura 13.

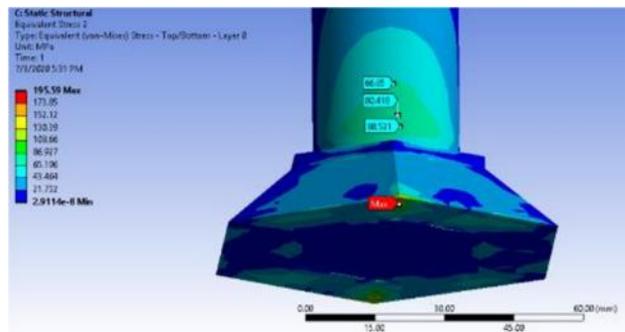


Figura 13. Resultado numérico de esfuerzo máximo en zona de soldadura por esfuerzo a cortante.

Ensayo experimental

Topología del espécimen

La preparación del espécimen consta de dos partes: una parte metálica y una parte de material compuesto, ambas se describen a continuación.

Parte metálica

La parte metálica se compone de una placa rectangular de acero estructural A36 de 1/2" de espesor, con dimensiones 150 mm x 150 mm; y un tornillo de 1-1/4" de diámetro por 150 mm de longitud (Pavonado en grado 8.8). La unión entre placa y tornillo se realiza con soldadura UTP-7018 sobre la superficie de la placa como se muestra en la Figura 14.

La masa de este arreglo es de 3.8 kg, por lo que la masa total que se agrega al sistema estructural del molde del aspa de 30 m es de 539.6 kg ya que se requiere un total de 142 arreglos similares repartidos entre 15 soportes tipo costilla del molde.

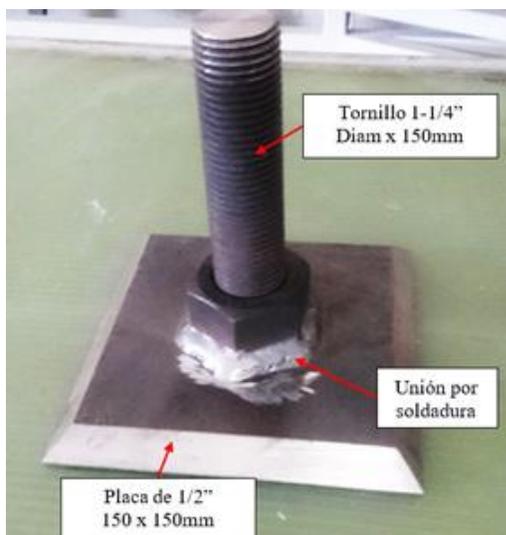


Figura 14. Características del arreglo de la parte metálica.

Material compuesto

El material compuesto consiste en un arreglo rectangular de 0.5 m x 0.5 m (separación promedio que hay entre placas de los primeros 3 soportes tipo costilla de la estructura metálica), que representan la zona de mayor concentración de carga.

El arreglo del material compuesto es de 12 capas de fibra de vidrio biaxiales de 0.65 mm de espesor cada una, con un total de material compuesto de 7.8 mm que representa al molde (Lado presión o Lado Succión). La Figura 15 muestra parte del proceso de manufactura el cual se lleva a cabo por medio de Moldeo por Transferencia de Resina Asistido por Vacío (VARTM).

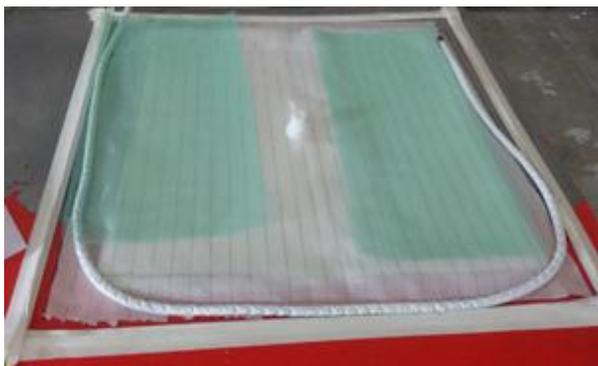


Figura 15. Modelo de fibra de vidrio de 12 capas BIAx antes de la infusión.

Manufactura del espécimen

Una vez que se tiene tanto la parte metálica como el material compuesto, se unen ambas partes para formar un solo espécimen para la prueba. Se coloca la placa metálica en el centro del material compuesto (175 mm de cada borde de la placa al borde del material compuesto) haciendo mediciones con una regleta, ver Figura 16.

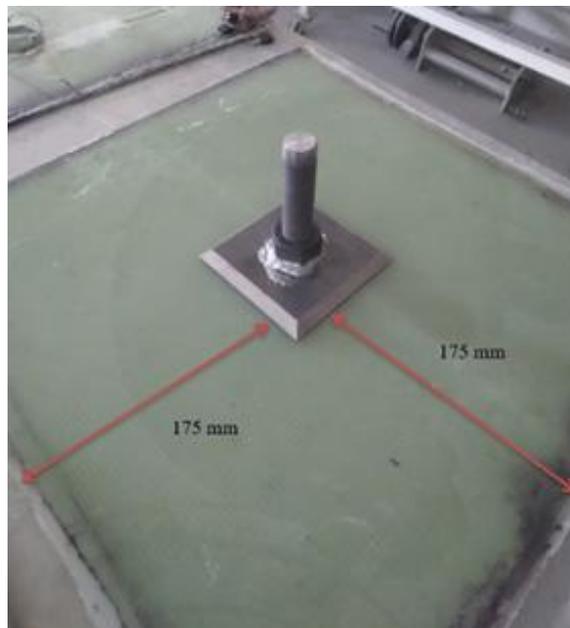


Figura 16. Posicionamiento de parte metálica sobre material compuesto.

Se agrega adhesivo entre la placa embebida y la superficie del compuesto (adhesivo tipo Epikure MGS BPH 137G) y se coloca nuevamente sobre el compuesto usando espaciadores para lograr el espesor requerido. El espesor del adhesivo en el ensamble real es variable ya que la superficie del molde es curva por naturaleza. Por este motivo, se analiza el modelo CAD y se especifica el espesor del adhesivo con base en la separación de la placa y el molde. El rango de separación va desde 1 mm hasta 10 mm, por esta razón se propone utilizar un espesor promedio de 5 mm, ver Figura 17.

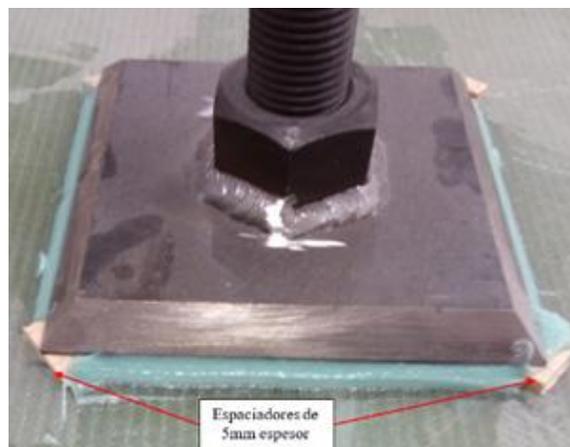


Figura 17. Unión con adhesivo con apoyo de espaciadores.

Se deja curar por aproximadamente 24 h para lograr las mejores propiedades mecánicas. Posteriormente, la placa de prueba se embebe al molde de fibra de vidrio haciendo un tendido de fibras por encima de la placa metálica y con suficiente área de contacto para evitar que se despegue durante la prueba a tensión. En este caso, se usó el 25 % de fibras por encima, en comparación con las que se tienen por debajo, es decir, 3 láminas de fibra de vidrio. Se observa la Figura 18 para mejor referencia.

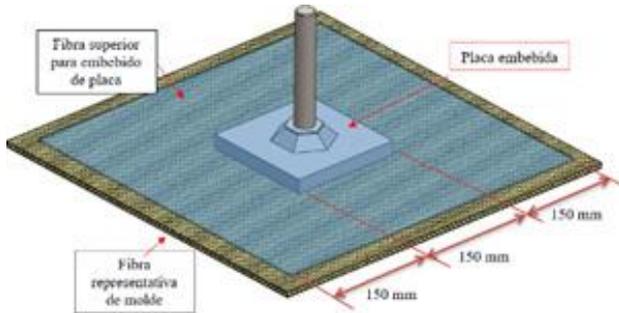


Figura 18. Tendido de telas sobre placa metálica.

Posterior al embebido, se requiere hacer perforaciones al espécimen de tal manera que se fije a la placa base del herramental para inmovilizarla durante las pruebas. La Figura 19 muestra al espécimen terminado.

Se fabrican dos especímenes: uno para el ensayo a tensión y otro para el ensayo a cortante, de manera independiente.

Descripción del herramental de pruebas

El herramental de ensayos al cual se fija el espécimen se muestra en la Figura 20. Consta de una placa base, 4 placas de presión para mantener fijo al espécimen, y tensores a cortante y a tensión. Tanto el herramental como el espécimen tienen la misma barrenación circunferencial de tal manera que durante las pruebas de tensión y de cortante el espécimen se mantenga siempre fijo.



Figura 19. Especimen de unión atornillada embebida.

Configuración para prueba a Tensión

El herramental cuenta con 2 tensores para la aplicación de carga a tensión como se muestran en la Figura 21. Se presiona a la fibra de vidrio entre 4 placas de acero de 5/8" por medio de 20 tornillos M12 de manera simétrica de tal manera que queden fijas durante la prueba.

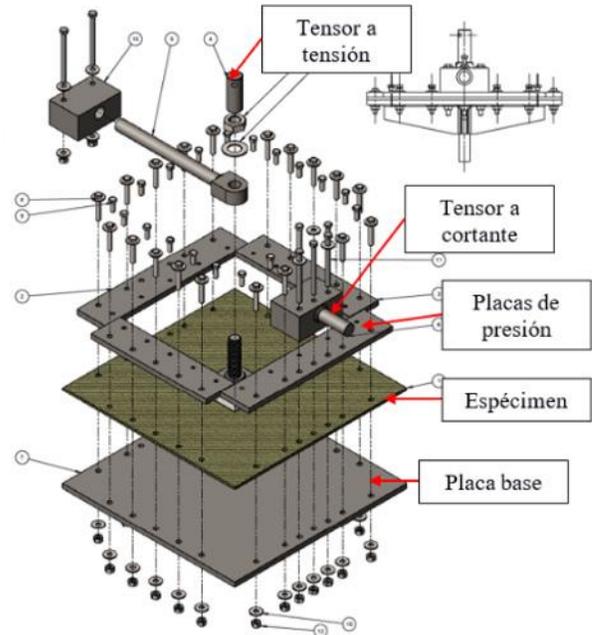


Figura 20. Herramental de ensayo para prueba a tensión y a cortante.

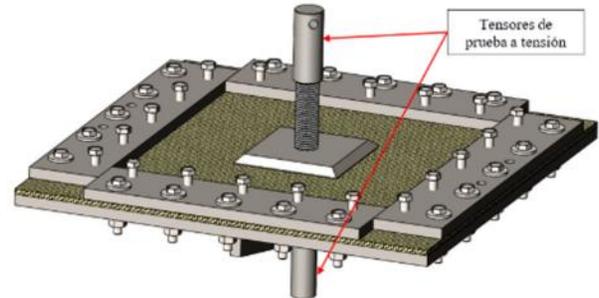


Figura 21. Montaje de espécimen en herramental de prueba con configuración a tensión.

Configuración para prueba a Cortante

Se remueve el tensor superior a tensión y se colocan 2 tensores a cada lado como se observa en la Figura 22 para la aplicación de carga a cortante.

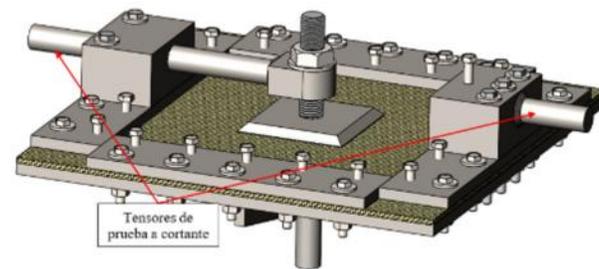


Figura 22. Montaje de espécimen en herramental de prueba con configuración a cortante.

La Figura 23 muestra un corte vertical del arreglo para entender el método de ensamble y fijación del espécimen en el herramental.

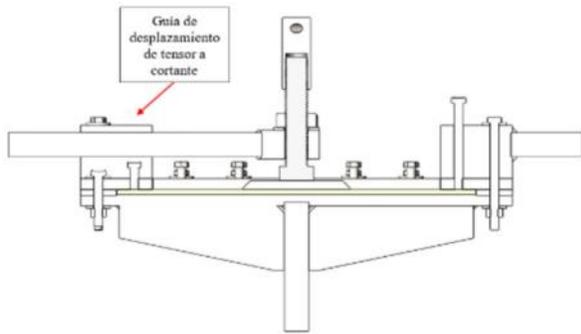


Figura 23. Corte vertical del arreglo de herramental con configuración a cortante.

El bloque guía mostrado en la Figura 23 sirve para controlar el posicionamiento del tornillo y evitar grandes separaciones del material compuesto con respecto a la placa base, ver Figura 24.

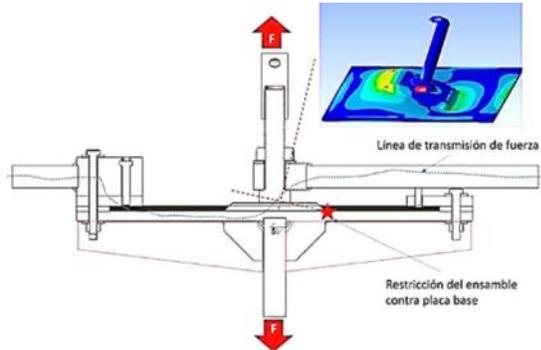


Figura 24. Deformación esperada del perno durante prueba a cortante.

Descripción de la máquina de ensayos

Ambas pruebas de tensión y a cortante se llevan a cabo mediante el uso de una prensa hidráulica marca Shimadzu modelo UH-500kNX, de 500 kN de capacidad (ver Figura 25).



Figura 25. Prensa Shimadzu de 500kN para pruebas de tensión y cortante de placa embebida.

Las dimensiones generales de la prensa muestran una carra de agarre de 900 mm para tensión como se observa en la Figura 26. Las dimensiones efectivas de la mesa de trabajo son de 650 mm x 650 mm.

Model		UH-500kNX	UH-F500kNX
Servo valve	Type	UH-500kNX	UH-F500kNX
Hybrid	Hybrid Type	UH-500kNXh	UH-F500kNXh
Capacity			
Max. capacity		500 kN	
Force range		rangeless	
Analog indicator (option)		500/250/100/50/25/10 kN	
Specifications			
1. Tensile test	Max. grip span (mm)	900	
	Grip face for rod specimens (mm)	ø12 to 50, 1 type With liner	ø12 to 30 ø30 to 50 (option)
	Grip face for flat plate specimens (option) *3	0 to 45, 1 type (60 in width)	0 to 30 30 to 50 (60 in width)
2. Compression test	Max. compression plate span (mm)	800	800
	Compression plate size (mm)	ø120	ø120
3. Transverse/bending test (option) *4	Max. support span (mm)	600	600
	Support diameter x width (mm)	50 x 160	50 x 160
	Punch tip radius (mm)	25	25
	Punch width (mm)	160	160
7. Column span (mm)		650	650
B. Effective table dimensions (W x D) (mm)		650 x 650	650 x 650

Figura 26. Especificaciones de máquina de tensión de 500kN.

Descripción de la prueba a Tensión

Paso 1: Se coloca la placa base sobre la máquina de ensayos, ver Figura 27.



Figura 27. Posicionamiento de placa base sobre máquina de ensayos.

Paso 2: Se coloca el espécimen sobre la placa base, Figura 28

Paso 3: Se colocan las 4 placas de presión sobre el espécimen y se atornillan utilizando tornillos M12 x 70 mm, ver Figura 29. Se utilizan 5 tornillos por cada placa (20 tornillos de fijación de espécimen en total).



Figura 28. Posicionamiento de espécimen sobre placa base.



Figura 29. Posicionamiento de placas de presión sobre el espécimen.

Paso 4: Se insertan los tornillos opresores adicionales de las placas de presión (M12 x 30 mm), ver Figura 30. Se utilizan 5 tornillos por cada placa (20 tornillos de fijación de espécimen en total).



Figura 30. Posicionamiento de tornillos opresores de espécimen en las placas de presión.

Paso 5: Insertar el tensor de tensión en la cuerda del tornillo de la placa embebida, ver Figura 31. Girarlo hasta que ya no pueda introducirse más.

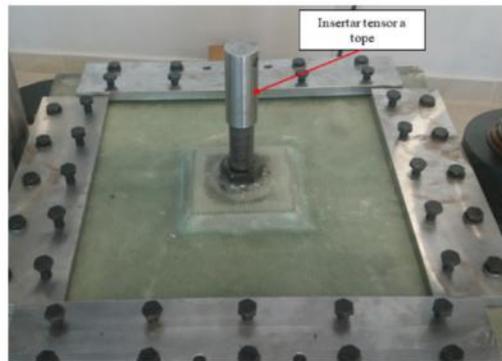


Figura 31. Insertar tensor de tensión superior en toda la rosca del tornillo.

Paso 6: Levantar al herramental y ajustar el agarre de la mordaza inferior, ver Figura 32.

Paso 7: Se ajusta la altura de ambas mordazas de la máquina, de tal manera que ambas mordazas (inferior y superior) tengan el agarre suficiente de los tensores, ver Figura 33. Una vez que la mordaza superior tiene el área de agarre suficiente, se cierra girando la manija superior de la máquina y se procede a realizar las pruebas de tensión al valor objetivo de 4,327.5 N [450 kg aproximadamente, ver Tabla 1].



Figura 32. Ajuste de tensor inferior en mordaza de máquina de ensayos.

Descripción de la prueba a Cortante

Paso 1: Se gira el espécimen a 90° y se utilizan los tensores a cortante como se observa en la Figura 34 de tal forma que cuando los tensores estén colocados en la prensa se realice una carga a tensión en la prensa pero que represente una carga a cortante en el espécimen.



Figura 33. Ajustar altura entre mordazas de la máquina.



Figura 34. Ajuste de herramienta para prueba a cortante.

Paso 2: Se coloca una tuerca de seguridad en el tornillo de la placa embebida, que en este caso es el mismo tensor de tensión, para evitar desplazamiento del tensor a cortante durante un posible pandeo del espécimen, ver Figura 35.

Análisis de resultados del ensayo experimental

Los objetivos de la prueba a tensión y a cortante se dividen como sigue:

- Realizar 5 iteraciones de la carga objetivo
- Llevar al límite el espécimen y conocer su límite de fallo

Resultados del ensayo a Tensión

Se realizan las 5 iteraciones de carga a tensión al valor objetivo de 4,327.5 N (~450 kg) y se grafica la curva Fuerza – Desplazamiento. La grafica de la Figura 36 muestra la 5ta iteración del ensayo a tensión.



Figura 35. Colocación de tuerca de seguridad.

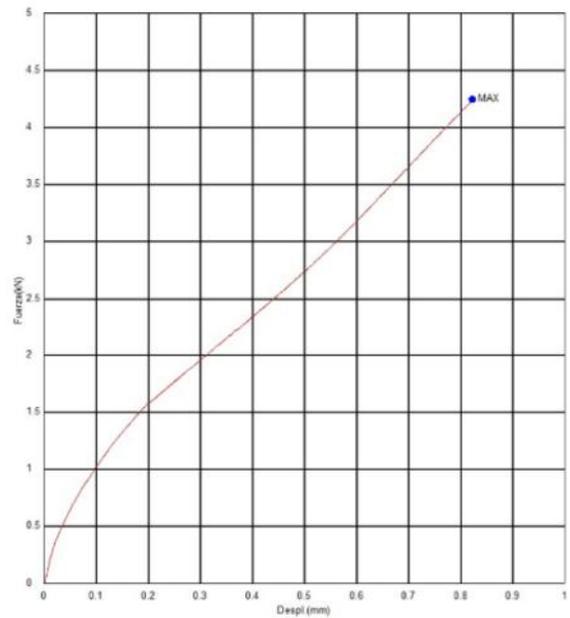


Figura 36. 5ta iteración de prueba a tensión.

En la Tabla 3 se presenta el resumen de cargas para las 5 iteraciones de carga a tensión con el valor objetivo de 4,327.5 N.

Tabla 3. Resumen de resultados de prueba a tensión de placa embebida.

Iteración	Fuerza (kN)	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)
1	4.1769	425.77	1.62
2	4.2865	436.95	0.7626
3	4.2874	437.04	0.808
4	4.2820	436.49	0.799
5	4.2445	432.67	0.822
Promedio	4.2751	435.79	0.7979

Durante la 1ra iteración hubo un reacomodo del herramental, por esta razón, se observa un desplazamiento mayor que 1.62 mm. Para el valor promediado solamente se consideran las iteraciones 2 a la 5.

Del análisis numérico con una carga de 4,327.5 N en dirección de la prueba a tensión (Y), se estimó una separación de 0.6869 mm que se acerca al valor real del ensayo de 0.7979 mm (promediado).

Físicamente, después de la prueba a tensión, el espécimen no presenta mayor daño ni se observa desprendimiento alguno de las fibras.

Para culminar el ensayo a tensión se procede a realizar la prueba de fallo a tensión. Esta vez, la maquina se lleva a una carga de tensión elevada pero controlada manual y gradualmente. La grafica de fuerza vs desplazamiento máximo se observa en la Figura 37, mientras que los resultados se resumen en la Tabla 4.

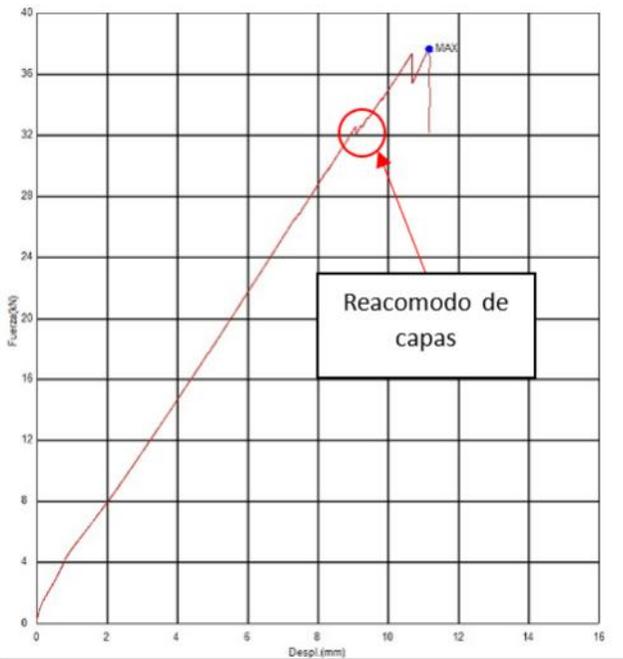


Figura 37. Prueba de fallo a tensión.

Tabla 4. Resumen de resultados de prueba de fallo a tensión.

Iteración	Fuerza (kN)	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)
Prueba a fallo en tensión	32	3,261.97	9

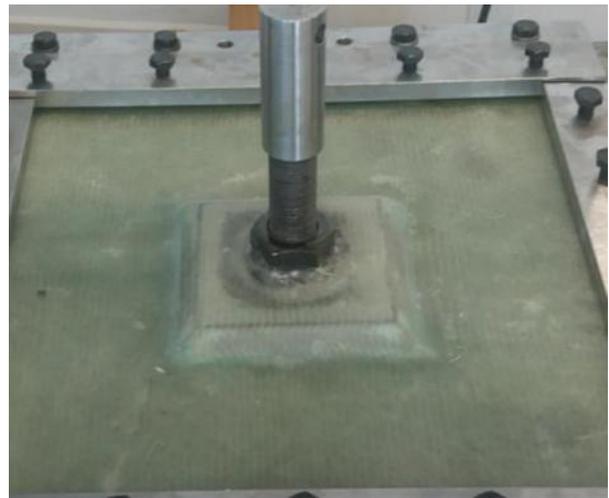
El espécimen soportó una carga de más de 3 t a tensión y tuvo un desplazamiento máximo de 11.18 mm, sin embargo, en la Figura 37 se observa un reacomodo de fibras a una fuerza de 32 kN y un desplazamiento de 9 mm, por lo que se logra un factor de seguridad de hasta 7.5.

Visiblemente se observó un desprendimiento de fibras sin llegar a despegarse completamente del espécimen, específicamente en el contorno de la placa embebida como se muestra en la Figura 38.

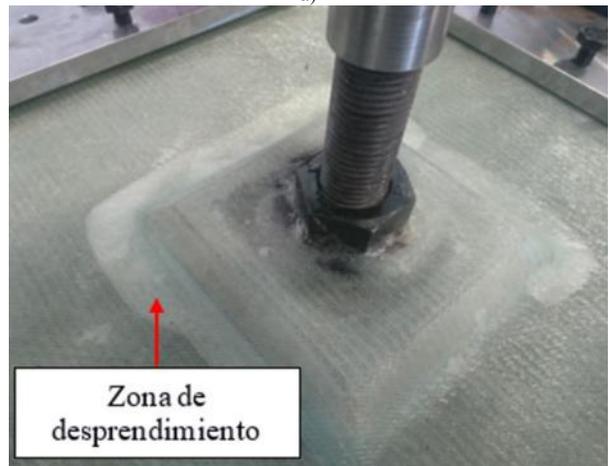
Se suspendió la prueba cuando se escuchó el sonido del rompimiento de las fibras.

Resultados del ensayo a Cortante

Se realizan las 5 iteraciones de carga a cortante al valor objetivo de 6,004.9 N (~600 kg) y se grafica la curva Fuerza – Desplazamiento. La gráfica de la Figura 39 muestra la 5ta iteración del ensayo a cortante.



a)



b)

Figura 38. Revisión física de fallo a) Antes; y b) Después de la prueba de fallo a tensión.

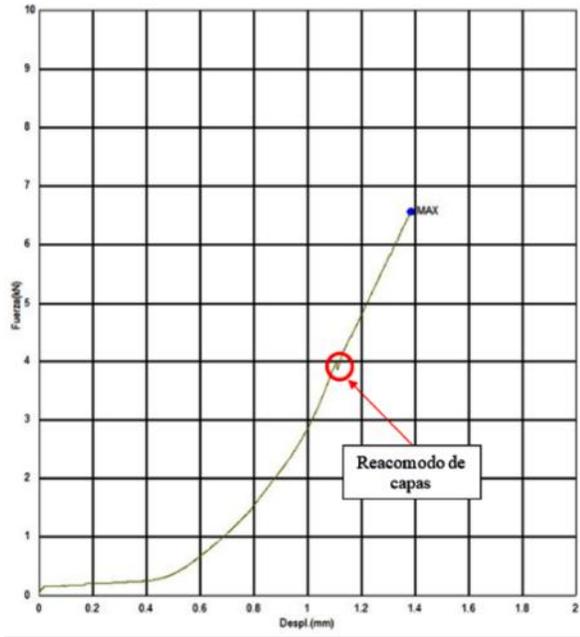


Figura 39. 5ta iteración de prueba a cortante.

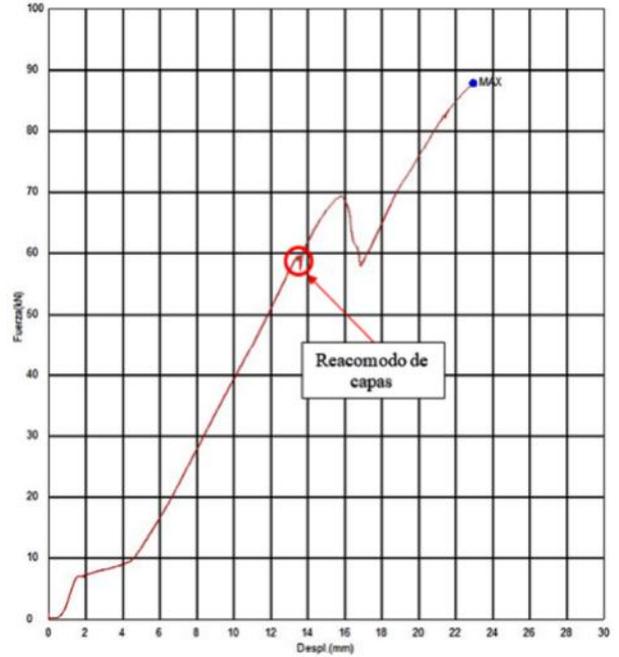


Figura 40. Prueba de fallo a cortante.

En la Tabla 5 se presenta el resumen de cargas para las 5 iteraciones de carga a cortante con el valor objetivo de 6,004.9 N.

Tabla 5. Resumen de resultados de prueba a cortante de placa embebida.

Iteración	Fuerza (kN)	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)
1	6.4618	658.69	1.9308
2	4	407.74	1.1
3	4	407.74	1.1
4	3.6	366.97	1.1
5	4	407.74	1.1
Promedio	3.9	397.55	1.1

En este caso, no se observó reacomodo de herramental, pero sí hubo un reacomodo de capas en las iteraciones 2 a la 5. La carga más baja se registró en la 4ta iteración y fue de 3.6 kN [366.97kg]. Debido a la discrepancia entre la 1ra y las siguientes 4 iteraciones se hace el promedio solo de estas últimas 4 y tomando el punto de reacomodo de capas como el valor máximo de resistencia del material. El desplazamiento promediado es de 1.1 mm, y la carga máxima antes del reacomodo de capas fue de 366.97 kg sin que existan visiblemente daños al espécimen 2.

Posteriormente, se realiza la prueba de fallo a cortante. La grafica de fuerza vs desplazamiento máximo se observa en la Figura 40. Los resultados se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de resultados de prueba de fallo a cortante.

Iteración	Fuerza (kN)	Carga (kg)	Desplazamiento (mm)
Prueba a fallo en cortante	59	6,014.27	13.5

El espécimen soporto una carga de más de 8 t a cortante y tuvo un desplazamiento máximo de 23 mm, sin embargo, en la Figura 40 se observa un reacomodo de fibras a una fuerza de 59 kN con un desplazamiento de 13.5 mm, por lo que se logra un factor de seguridad de más de 9.

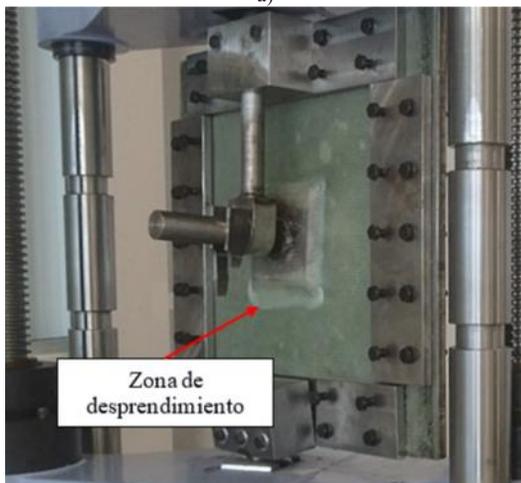
Visiblemente se observó un desprendimiento de fibras sin llegar a despegarse completamente del espécimen, específicamente en el contorno inferior de la placa embebida en dirección de la fuerza aplicada como se muestra en la Figura 41.

Tabla 7. Resumen de resultados de ambas pruebas.

Variable de prueba	Desplazamiento promedio de espécimen a tensión	Desplazamiento promedio de espécimen a cortante
Resultado numérico	0.68 mm	0.98 mm
Resultado experimental	0.79 mm	1.1 mm
Correlación	13.9 %	10.9 %
Carga de diseño	4,327.5 N	6,004.9 N
Carga límite de fallo	32,000 N	59,000 N
Factor de Seguridad	7.39	9.82



a)



b)

Figura 41. Revisión física de fallo a) Antes; y b) Después de la prueba de fallo a cortante.

Conclusiones

El resultado de análisis numérico a tensión muestra un desplazamiento de la placa embebida de 0.68 mm mientras que en el ensayo experimental se observa un desplazamiento de 0.79 mm lo que representa una diferencia del 13.9%. Para el caso de carga a cortante se obtiene un valor numérico de 0.98 mm, y en el ensayo experimental a cortante el valor promedio es de 1.1 mm lo que representa una diferencia del 10.9%. El resumen de los resultados de ambas pruebas se muestra en la Tabla 7.

Los valores de carga objetivo para tensión y para cortante demuestran que el espécimen embebido con 3 capas de fibra de vidrio biaxiales, el uso de adhesivo tipo Epikure MGS BPH 137G entre la placa embebida y la superficie del com-

puesto, y el uso de un tornillo de 1-1/4" resisten las cargas de prueba con valores que exceden factores de seguridad de 7.5 y 9 para tensión y para cortante respectivamente.

De acuerdo con las gráficas de fuerza – desplazamiento se observan lo que podría significar reacomodo de fibras pero que visiblemente no llegan a desprenderse las fibras del material compuesto (Romperse o desprenderse del espécimen). Esto implica que se puede someter a una carga por encima del valor objetivo sin que exista un rompimiento de las fibras.

Al correlacionar los resultados numéricos con los resultados experimentales, y cuantificar la diferencia entre ambos con márgenes razonables, se valida no solo la precisión del modelo numérico, sino también la viabilidad estructural de la configuración propuesta. Los resultados constituyen una aportación relevante en el campo de diseño estructural y validación de uniones híbridas (metal-compuesto) en sistemas de fabricación de aerogeneradores. En particular, esta metodología para caracterizar la unión estructural embebida en moldes de material compuesto a gran escala aborda una problemática poco documentada en la literatura, específicamente en el contexto de operaciones de volteo y ensamble de aspas de aerogeneradores. Esto ofrece una base técnica valiosa para el diseño seguro de estos moldes, que en futuros trabajos se puede mejorar la eficiencia y optimización de los recursos para mejorar los procesos de manufactura en la industria eólica.

Los resultados pueden ser extrapolados a otras aplicaciones donde se utilicen uniones atornilladas embebidas en materiales compuestos bajo carga mixta, por ejemplo, moldes en la fabricación de componentes aeronáuticos o náuticos, uniones estructurales en vehículos livianos con uso de materiales híbridos (metal-compuesto), sistemas modulares de fijación para infraestructuras energéticas (como paneles solares), y en componentes reparables en turbinas eólicas donde se reemplazan secciones de molde o aspas. En estos contextos, la combinación de modelado numérico validado y datos experimentales permite adaptar el diseño de uniones con mayor confianza, considerando la seguridad estructural.

Discusión y perspectivas futuras

Una limitación relevante del estudio es la omisión del análisis de cargas fluctuantes, sin embargo, considerando que las operaciones de volteo, manipulación y ensamble del molde están sujetas a un mínimo de ciclos de carga durante la fabricación de las aspas (una vez que la media concha del aspa ha sido fabricada, solo se volteo una sola vez para ser pegada con la media concha restante), el análisis se centró en dos casos de carga principales: tensión y cortante, por ser representativos de las condiciones más críticas durante el volteo y ensamblaje del molde. Se reconoce que en la práctica pueden presentarse combinaciones más complejas, tales como: cargas combinadas, torque inducido, vibraciones, por lo que en los trabajos futuros se recomienda extender el es-

tudio a estados de carga multiaxiales, incorporando modelos no lineales y que permitan una caracterización más realista y robusta del comportamiento de estas uniones embebidas.

Con respecto a los materiales utilizados, el presente estudio utiliza fibra de vidrio biaxial para el espécimen de prueba, por su disponibilidad, facilidad de procesamiento y uso extendido en aplicaciones de energía eólica. Otros materiales como la fibra de carbono, y compuestos termoplásticos reforzados (policarbonatos) podrían ofrecer ventajas significativas en términos de resistencia mecánica, rigidez o durabilidad, sin embargo, dado que las capas del aspa de 30 m son de fibras biaxiales, existe un tema de caracterización térmica, en el que tanto el molde y el aspa deberán ser siempre manufacturados con los mismos materiales para minimizar desplazamientos distintos durante la expansión térmica del proceso de curado, y que esto pudiera desencadenar en un aspa con geometría distinta a la del molde, aunado a que el coste de manufactura se incrementaría considerablemente.

Durante la fase experimental del estudio se realizaron únicamente 5 iteraciones de carga y descarga por cada tipo de esfuerzo (tensión y cortante), utilizando un espécimen específico para cada caso. La decisión se fundamenta en criterios técnicos y metodológicos relacionados con los objetivos principales del estudio y las limitaciones operativas del laboratorio. El enfoque no está orientado a un análisis estadístico de repetibilidad o dispersión, sino a verificar la capacidad del modelo para predecir el comportamiento mecánico de la unión embebida. El protocolo de ensayo consideró que más iteraciones podrían inducir daño progresivo no contemplado en el modelo FEM, sesgando la comparación, además de que la prueba de límite de fractura se viera comprometida. Finalmente, las restricciones logísticas y de tiempo asociadas al uso de la máquina universal de ensayos y al coste de fabricación de los especímenes, influyeron en la decisión de limitar el número de repeticiones. Esta práctica es común en estudios exploratorios o de validación preliminar, especialmente cuando se trabaja con prototipos a escala y configuraciones especializadas.

Los resultados obtenidos ofrecen información inicial muy útil en esta etapa como prueba de concepto o validación inicial del modelo numérico, además de que el resultado da seguridad para acortar el tiempo de fabricación. Sin embargo, se reconoce que, para alcanzar recomendaciones más robustas de diseño, será necesario en futuras investigaciones ampliar el número de especímenes y ciclos, realizar análisis de repetibilidad (caracterización estadística de los resultados), emplear técnicas de diseño de experimentos (evaluar la sensibilidad del sistema ante variaciones geométricas, materiales y de condiciones de carga), y eventualmente incorporar ensayos de fatiga, de manera que se pueda representar la variabilidad inherente a procesos de manufactura, materiales compuestos y condiciones de operación reales (factores como el contenido de resina, la calidad del adhesivo, el nivel de curado, la alineación del perno, y el modo de carga pueden influir significati-

vamente en el comportamiento estructural).

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), ahora SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Al Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.).

Referencias

- [1] Amsalu, C., Negasa, D., & Merga, A. (2024). *Numerical analysis of fiber reinforced composite material for structural component application*. Heliyon, 10(18).
- [2] Sápi, Z. (2019). *Design, analysis and testing of composite T-joints* (Doctoral dissertation, University of Bath).
- [3] Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Sanyang, M. L., Ishak, M. R., & Zainudin, E. S. (2018). *Nanocrystalline cellulose as reinforcement for polymeric matrix nanocomposites and its potential applications: a review*. Current Analytical Chemistry, 14(3), 203-225.
- [4] Keller, E. J. C., & Worrall, C. A. (1983). *Review of Composite to Metal Joining Using Through-thickness Enhancement (Hybrid Joining)*. NATO Science and Technology Organization, 21.
- [5] Su, R. K. L., Lam, W. Y., & Pam, H. J. (2008). *Behaviour of embedded steel plate in composite coupling beams*. Journal of Constructional Steel Research, 64(10), 1112-1128.
- [6] Liu, S., Xu, Y., Cheng, X., Qi, J., & Dong, G. (2015, July). *Experimental investigation on performance of composite joints with embedded steel plate*. In 20th ICCM conference.
- [7] Melograna, J. D., & Grenestedt, J. L. (2002). *Improving joints between composites and steel using perforations. Composites Part A: applied science and manufacturing*, 33(9), 1253-1261.
- [8] Ucsnik, S., Scheerer, M., Zarembo, S., & Pahr, D. H. (2010). *Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(3), 369-374.
- [9] Xu, L., Kharghani, N., Li, M., & Soares, C. G. (2021). *Design improvement of a composite-to-steel butt-joint based on finite element analysis*. Ocean Engineering, 238, 109771.