

Diseño e Implementación de Banco de Ensayos para Aspas de Turbinas Eólicas

Design and Implementation of Test Bench for Wind Turbine Blades

Muñoz Hernández Guillermo*, Hernández Arriaga Isaac², Navarro Rosales Israel³, Vilet Espinosa Carlos Alberto⁴, Ramón Cipriano Filiberto⁵, Rodríguez Jaime Jorge⁶, Reyes Ronzon Alberto Arturo⁷, Belmudez Estrada José Antonio⁵
CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada

Av. Del Retablo No. 150, Col. Constituyentes Fovissste, CP 76150, Querétaro, México. Tel (442)1961500

*guillermo.munoz@ciateq.mx, ²izaak.hernandez@gmail.com, ³israel.navarro@ciateq.mx, ⁴carlos.vilet@ciateq.mx,

⁵framon@ciateq.mx, ⁶jorge.rjaime@ciateq.mx, ⁷areyes@ciateq.mx, ⁵jose.belmudez@ciateq.mx

Resumen

Bajo la colaboración con instituciones nacionales y extranjeras CIATEQ desarrolló la capacidad de manufactura y ensayo de aspas de turbinas eólicas a escala MW. El presente trabajo describe el diseño e implementación de un banco de ensayos, el cual permitió ensayar un aspa de 29 m de longitud para la verificación de los supuestos de diseño. Se presenta la secuencia de diseño de un banco de ensayos, como etapas sucesivas de ingeniería conceptual y de detalle, así como el proceso de manufactura e implementación. La implementación fue realizada a través del ensayo estático flapwise+, aplicando las cargas de prueba.

Abstract

CIATEQ developed the manufacturing and testing capacity in collaboration with national and foreign institutions for wind turbine blades on MW scale. The present work presents the design and implementation of a test bench, which allowed us to test a 29 m wind blade for the verification of the design assumptions. The design sequence given by conceptual and detailed engineering is presented, as well as the manufacturing and implementation process. The implementation was carried out through the static flapwise+ test, applying the test loads.

Palabras clave:

Banco de Ensayos, Prueba de Aspas, Energía Eólica

Keywords:

Test Bench, Blade Testing, Wind Energy

Nomenclatura

F.S.	Factor de seguridad
Mu	Resistencia requerida a flexión
P1, P2, P3. P4, P4, P5	Cargas de prueba
qadm	Capacidad de carga admisible en el suelo
Sy	Resistencia a la cedencia
X, Y, Z	Coordenadas en los ejes cartesianos
ϕMn	Resistencia nominal a flexión
flapwise+	Posición del aspa durante el ensayo correspondiente a la dirección positiva de las cargas de prueba, desde lado presión hacia el lado succión del aspa [1]

Introducción

El propósito de los ensayos de aspas de turbinas eólicas es confirmar con un nivel aceptable de probabilidad que toda la población de un tipo de aspa cumple con los supuestos de diseño [2]. La norma IEC 61400-23 establece los requisitos para el ensayo de aspas de turbinas de eje horizontal con área de barrido mayor que 200 m², a través de ensayos estáticos y de fatiga. Los ensayos estáticos son realizados a través de infraestructura para aplicar cargas de prueba equivalentes que generan una curva de momento igual o mayor a la curva

de momento de flexión extrema sobre el aspa muestra. La infraestructura de ensayos típicamente incluye un bloque de reacción (Figura 1), herramientas de montaje, herramientas de aplicación de cargas, instrumentación, el sistema de control y el sistema de adquisición de datos. En México no se dispone de infraestructura para ensayos de aspas para turbinas mayores que 1 MW (escala MW). Esto es, no se dispone del bloque de reacción y los herramientas necesarios para los ensayos del aspa; por lo que su diseño e implementación constituye el objetivo del presente artículo.

Antecedentes

En México el desarrollo eólico tiene cada vez más impactos en la economía nacional y regional, por ejemplo; a mayo de 2022 se encuentran operando alrededor de 3,247 turbinas en 70 parques eólicos en 15 Estados de la República, produciendo 7,312 MW que representan el 8.16% de la capacidad instalada. Esto significa el abastecimiento del consumo de más de 14 millones de hogares y 12.2 millones de toneladas de CO₂ evitadas por año, equivalentes a sacar 3 millones de autos de circulación [3]. A pesar de que los aerogeneradores tienen una vida útil de 20 a 25 años, las aspas son uno de los componentes más susceptibles a falla durante la operación, de los más importantes se pueden mencionar los daños superficiales por erosión por lluvia, arena, granizo o

por impactos con objetos pequeños y rupturas por descargas eléctricas. En el mejor de los casos, estas fallas reducen el desempeño de las aspas y en el peor de los casos, provocan daños estructurales en las aspas que terminan por colapsarlas. Por todo lo anterior, es evidente que existe un mercado emergente para la inspección, reparación y mantenimiento de aspas de turbinas eólicas. Para el caso cuando la reparación del asa es significativa, es imprescindible asegurar su integridad estructural post-reparación, para ello suelen realizarse ensayos mecánicos a las aspas en infraestructura especializada.

Recientemente, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) apoyó al Gobierno de México a través de la operación al proyecto (GRT/FM-13249-ME) “Desarrollo de Tecnologías Eólicas Locales en México” liderado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) y financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, por sus siglas en inglés), donde uno de los alcances principales del proyecto es el diseño, construcción y puesta en operación de un banco para pruebas mecánicas de aspas para la Máquina Eólica Mexicana (MEM) de 1.2 MW y cuya contratación fue adjudicada a CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada. Este banco de ensayos es único en su tipo en México y está permitiendo desarrollar tecnología mexicana para el diseño, la manufactura y el mantenimiento de aspas.

En el mundo existe infraestructura de ensayos para aspas de turbinas mayores que 1 MW, la cual puede ser de alto costo y amplia versatilidad en la operación, tal como el banco del instituto alemán Fraunhofer (Figura 1) [4] o CFM (Figura 2). Estos sistemas incluyen la aplicación automática de cargas equivalentes y posicionamiento ajustable del asa por sistemas hidráulicos. Es común el montaje del asa a través de una placa adaptadora que permite el montaje al bloque de reacción a través de la placa base (Figura 3). Esta placa adaptadora es diseñada para acoplarse a las dimensiones de un asa específica. También existen bancos de menor costo con el uso de bloques de reacción fijos y la aplicación de pesos muertos predefinidos para el control de las cargas de prueba (Figura 4). El uso de pesos muertos controlados permite ajustar el momento de flexión de prueba. Este diseño, aunque presenta limitantes para el control de las condiciones ambientales de temperatura y humedad, se buscan las condiciones horarias para la realización de los ensayos con cobertura de los requisitos de la norma IEC 61400-23. El banco de ensayos que a continuación se presenta su desarrollo, se encuentra en esta última clasificación.

Desarrollo

Material y métodos

La metodología usada para el diseño del banco de ensayos inició con la definición de los requisitos del diseño seguido por las etapas secuenciales de la ingeniería conceptual e ingeniería de detalle [8]. La ingeniería básica se realiza en cada concepto para lograr las especificaciones dadas en los

requisitos del diseño. La implementación fue realizada una vez que la manufactura de los componentes fue terminada.

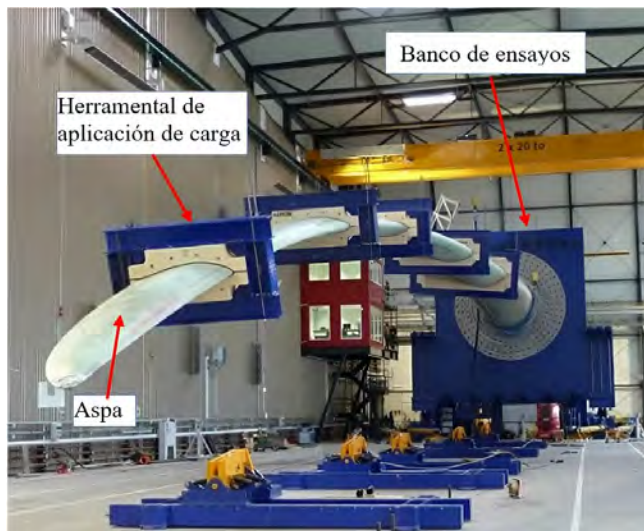


Figura 1. Banco de ensayos del instituto Fraunhofer alemán en posición del asa flapwise+. Fuente [4]



Figura 2. Banco de ensayos de CFM, con bloque de reacción ajustable. Fuente [5]

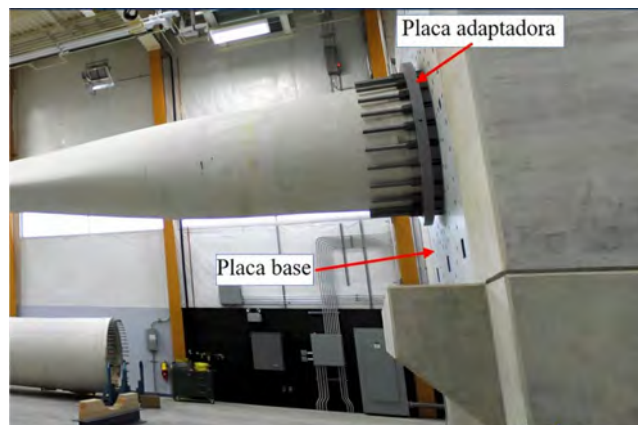


Figura 3. Banco de ensayos de la Universidad de Maine. fuente [6]

Requisitos de Diseño

Los requisitos del diseño fueron definidos para un aspa de 29 m de longitud, correspondiente a la Máquina Eólica Mexicana de 1.2 MW (Tabla 1). El momento máximo de flexión definido en el contrato fue de 4 MNm para el bloque de reacción. Sin embargo, bajo la condición de carga extrema en el aspa de 29 m, el momento máximo de prueba es ligeramente menor 3.15 MNm, ya incluido el factor parcial de carga de 1.1. Esto significa que la capacidad del bloque de reacción será ligeramente mayor que el momento del ensayo del aspa. El banco fue autorizado para construirse a la intemperie y el uso de 5 cargas de prueba predefinidas (Tabla 2), conforme el concepto de menor costo ilustrado en la Figura 4. La inclinación de la brida de montaje de 10° fue definida para compensar la flexión máxima de la punta del aspa y evitar contacto con el piso entre la punta del aspa y los herramientas de carga. El montaje del aspa sobre el bloque de reacción fue conceptualizado a través de un par de grúas con capacidad de carga de 8 ton a una distancia de 7 m desde el centro de la grúa.

Tabla 1. Requisitos de diseño del banco de ensayos

Requisitos del diseño	Magnitud	Unidad
Momento máximo de flexión en el bloque de reacción	4.00	MNm
Momento máximo de flexión en la raíz del aspa en posición flapwise+. Incluye factor de seguridad 1.1 por variación en manufactura de muestra de aspa [2]	3.15	MNm
Peso máximo del aspa	39,240	N
Peso de herramientas de montaje más peso muerto	153,778.83	N
Inclinación de brida de montaje en el bloque de reacción	10	°
Desplazamiento máximo de punta de aspa	6.5	m
Barrenos de montaje de aspa en placa adaptadora	56	-
Diámetro de barrenos de montaje de aspa placa adaptadora	33	mm
Longitud de aspa	29	m

Tabla 2. Magnitud de carga y posición en la longitud del aspa

	P1	P2	P3	P4	P5
Carga (N)	40,224.48	38,155.42	32,517.67	23,744.07	19,084.71
Ubicación en Z (m)	9.00	17.00	21.00	24.00	27.00

Ingeniería conceptual

El banco de ensayos está compuesto por dos componentes principales (Figura 5):

- Bloque de reacción de concreto armado y arreglos de anclas,
- Los herramientas de ensamble del aspa constituidos por la placa adaptadora, el juego de espárragos, casquillos y la placa base.

El concepto inicial A del banco de ensayos fue constituido por un bloque de reacción con un acceso cilíndrico en el centro y dos arreglos de espárragos concéntricos que unen la placa adaptadora a la placa base (Figura 5). Ambas placas fueron propuestas con el máximo espesor disponible en el mercado de 4 pulgadas en el momento de la fabricación (Tabla 3).

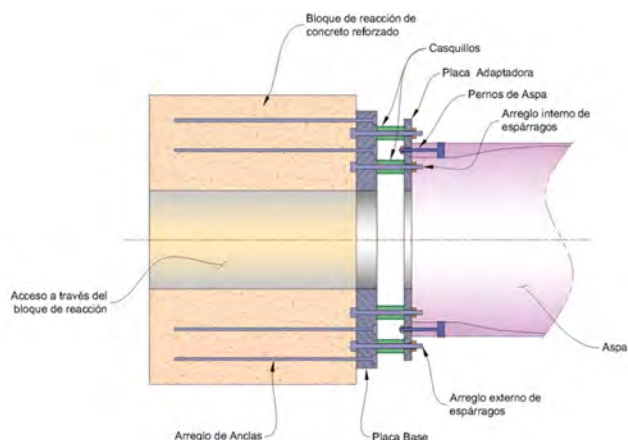
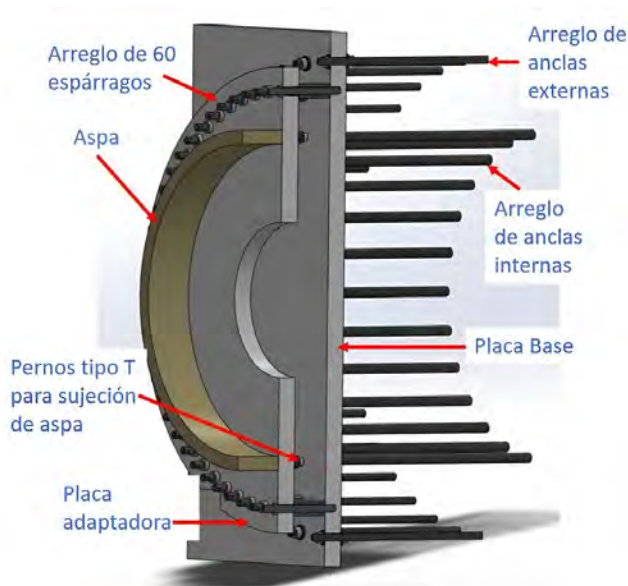
El acceso cilíndrico a través del bloque de reacción es un requerimiento funcional para realizar la actividad de apriete de espárragos del arreglo interno de espárragos. Sin embargo, se propuso eliminar este acceso para reducir las dimensiones del banco y por consiguiente el costo asociado a su construcción. Sumado a ello, el tema de seguridad del personal involucrado, ya que el acceso implica una posición poco ergonómica dentro de un área confinada de baja oxigenación. Para resolver estas restricciones, se propuso eliminar el arreglo interno de espárragos, considerando el máximo espesor disponible de las placas. Esta propuesta conceptual con un solo arreglo de 60 espárragos fue denominado concepto B (Figura 6). Esto implica diseñar primero el montaje de las placas y posteriormente el diseño del bloque de reacción.



Figura 4. Banco de ensayos de NREL. Fuente [7]

Tabla 3. Propiedades de los materiales de acero

Nº	Utilizado para	Material	Densidad (kg/m ³)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo último a la tensión (MPa)
1	Placa base, placa adaptadora, acoplamientos, cartabones, arillos de placas.	ASTM A-572 Gr. 50	7,850	345	450
2	Estructura soporte de placa.	ASTM A-36	7,850	240	400 – 550
3	Roldanas	DIN 125 - Clase 200HV compatible Gr. 8.8	7,850	800	1,030 – 1,190
4	Soldadura	E7018	7,850	207	270
5	Casquillos	AISI 1518	7,850	416	
6	Espárragos	SAE J429 Grado 8 / ASTM A-354 Gr. BD	7,850	800	1,030 – 1,190
7	Pernos en T	Grado 10.9	7,850	940	1,040
8	Anclas internas y externas	ASTM F1554 Gr. 36	7,850	240	400 - 550

**Figura 5.** Concepto A. Corte en sección transversal del montaje de aspa en el banco de ensayos.**Figura 6.** Concepto B. Banco de ensayos con un arreglo de espárragos

El concepto B fue analizado por el método de elemento finito (MEF) a través del software Ansys-Workbench (A-W), solamente para la placa adaptadora.

El modelo de elemento finito incluye el elemento tetraédrico SOLID227, utilizado en los análisis 3D en la modelación

física estructural. El elemento es de segundo orden con 10 nodos. En su formulación estructural incluye 3 grados de libertad por nodo correspondientes a los desplazamientos (UX, UY, UZ) y no incluye momentos para la aplicación de cargas. A-W clasifica el momento como una condición de frontera remota. Para su aplicación se usa la función de punto remoto y los puntos remotos son una herramienta para trabajar y controlar los grados de libertad del cuerpo. Los puntos remotos son una forma de abstraer una conexión a un modelo sólido, ya sea un vértice, arista, cara, cuerpo, nodo o cara de elemento a un punto en el espacio. El módulo de solución de A-W utiliza ecuaciones de restricción multipunto para realizar estas conexiones. Una vez que ha generado la malla, las líneas de conexión se dibujan entre el punto remoto y los nodos en la malla correspondiente de la geometría subyacente. Para asegurar que el momento se ha aplicado correctamente se verificaron las fuerzas de reacción del modelo [9].

Regresando al concepto B, los casquillos se restringieron con desplazamiento cero en todas las direcciones (X, Y, Z), simulando que están unidos a la placa base a través del arreglo de los 60 espárragos. Se aplicó el momento máximo de 4 MNm en la zona de contacto con el aspa (Figura 8). Se observó que un solo arreglo de casquillos y espárragos no es suficiente. El límite de cedencia del material de la placa adaptadora fue rebasado (Figura 9). En consecuencia, se propuso el concepto C, el cual incluye el arreglo externo de 60 espárragos y un acoplamiento circular de fijación entre la placa adaptadora y la placa base (Figura 10). El acoplamiento circular se ubica en la posición radial similar al arreglo interno de espárragos, para realizar la función de resistir las cargas de tensión que realizó el arreglo interno de espárragos. Se utiliza un separador circular para soportar las cargas de compresión en la parte inferior del arreglo interno de espárragos eliminado. La Tabla 4 proporciona una descripción breve de la función de los componentes adicionales mostrados en la Figura 10.

Tabla 4. Componentes y descripción funcional de cada componente

Componente	Función
Placa adaptadora	Permite trasladar el momento de diseño y el peso del aspa hacia el arreglo de espárragos y hacia el acoplamiento circular
Arreglo de espárragos	Contribuye a la transferencia parcial de las cargas del aspa hacia la placa base
Acoplamiento circular de la placa adaptadora	Componente circular unido por soldadura a la placa adaptadora que contribuye a la transferencia parcial de las cargas del aspa hacia la placa base
Acoplamiento circular de la placa base	Componente circular unido por soldadura a la placa base que contribuye a la transferencia parcial de las cargas del aspa hacia la placa base
Placa base	Traslada las cargas hacia el bloque de reacción a través de los dos arreglos de anclas de la placa base

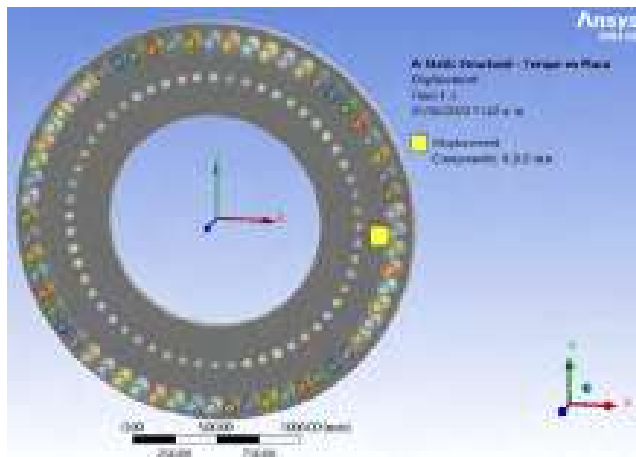


Figura 7. Modelo de elemento finito del concepto B

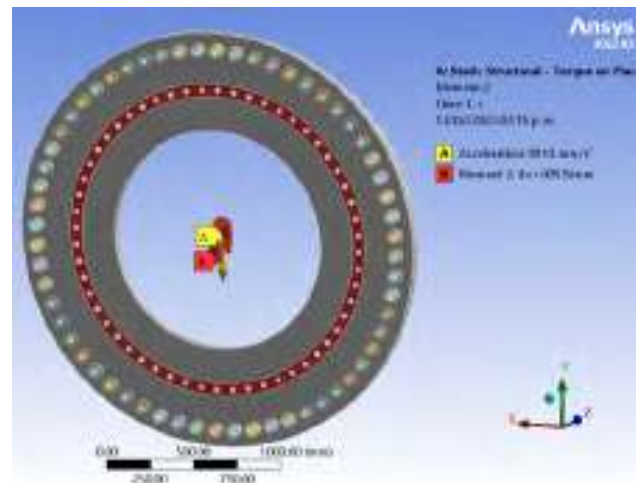


Figura 8. Cargas aplicadas en la placa adaptadora

El concepto C cubre el requisito funcional de apriete de espárragos desde fuera del aspa, pero se deberá controlar una distribución de carga entre los componentes. El montaje es hiperestático, con las simples ecuaciones de la estática no permite conocer la distribución de carga entre el acoplamiento circular y el juego de espárragos. Bajo este concepto, fue

necesario encontrar la mejor distribución de carga que evita alcanzar el límite de cedencia de cualquiera de los componentes. La manera de controlar tal distribución es el claro inicial entre los elementos de contacto del acoplamiento. (Figura 11).

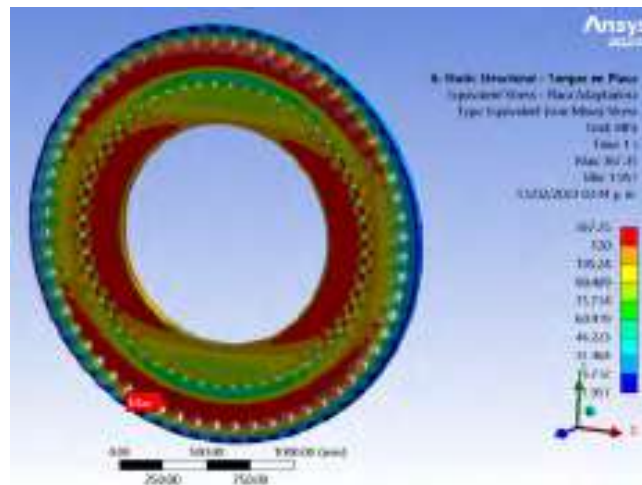


Figura 9. Esfuerzos de von Mises en placa adaptadora para el concepto B

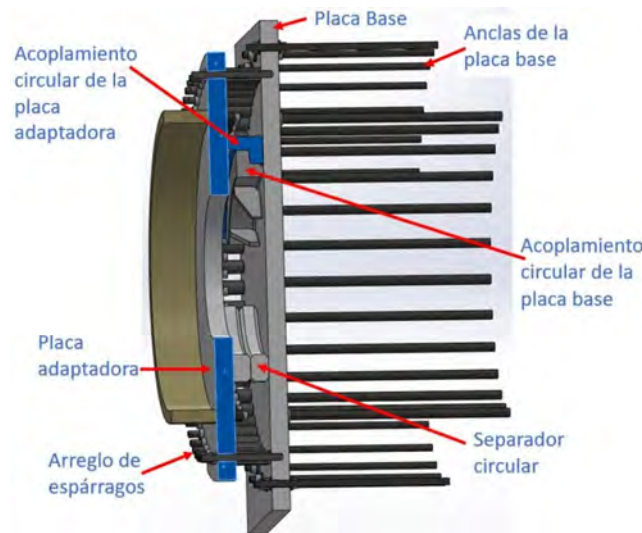


Figura 10. Concepto C. Banco de ensayos con un arreglo de espárragos y un acoplamiento circular

Las condiciones de frontera se aplican utilizando el sistema de coordenadas globales con el eje Z alineado con los ejes axiales de la raíz y de las anclas de la placa base internas y externas, como se muestra en la Figura 10 y la Figura 12.

Las condiciones de frontera se describen a continuación:

- En el área donde hace contacto con el bloque de concreto, la placa base está restringida en el eje Z por medio de una condición de sólo compresión (Figura 12).
- Las anclas internas y externas están restringidas en el área de la placa del ancla (embebida en el bloque de concreto) en el eje Z.

- c) Las anclas internas y externas están sujetas en el área cilíndrica embebida en el concreto y están restringidas en los ejes X y Y.
- d) La placa base está sujeta por las vigas de la estructura base que está embebida en el bloque de concreto. La placa base y las vigas están unidas totalmente.
- e) Las vigas de la estructura base que está embebida en el bloque de concreto están restringidas en X, Y y Z.

Los contactos se aplicaron al modelo del concepto C en grupos de elementos, de acuerdo con las partes adyacentes a ellos. En la Tabla 5, se mencionan los grupos principales de los contactos utilizados en el MEF.

Tabla 5. Tipo de contactos utilizados entre partes del modelo del MEF

No.	Utilizado para unir	Tipo de contacto	Valor
1	Anillo de Placa Base con Casquillos	Pegado (Bonded)	-
2	Soldadura con cualquier elemento soldado	Pegado (Bonded)	-
3	Anillo de Placa Adaptadora con Tuercas de Espárragos	Fricción	0.15
4	Anillo para pernos en T con tuercas	Fricción	0.15
5	Placa Adaptadora con Raíz de Aspa	Fricción	0.15
6	Claro (GAP) vertical y horizontal entre Cuñas	Fricción	0.15
7	Placa base y Placa Adaptadora con Anillos de Placas	Fricción	0.15
8	Anillo de Placa Adaptadora con Casquillos	Fricción	0.15

El primer análisis MEF fue realizado en un claro de 0 mm entre los acoplamientos circulares de la placa adaptadora y placa base. El esfuerzo máximo de von Mises de 338.24 MPa se dio en los espárragos, con un factor de seguridad de 2.36 (Figura 13). La placa adaptadora presenta un esfuerzo de von Mises máximo de 197.58 MPa (Figura 14), en un nodo únicamente, por lo que se trata de una singularidad de esfuerzo o perturbación [10]. Esta condición de contacto produce singularidad de esfuerzo similar a la aplicación de una carga puntual, esquinas agudas, esquinas de cuerpos en contacto y restricciones puntuales. Acin [10], cita el principio de St. Venant donde establece que el efecto de las perturbaciones locales en un campo de esfuerzo uniforme sigue siendo local. Más allá de la singularidad, los resultados serán correctos, por lo general tan lejos como el tamaño de la perturbación. Bajo esta condición se ha elegido el esfuerzo máximo de 152.03 MPa (Figura 15), el cual corresponde al esfuerzo en el lado opuesto del mismo barreno.

Como se trata de la carga extrema y no existen ciclos de fatiga en las cargas del ensayo estático, un FS permisible mínimo de 2 fue considerado para todos los componentes. La Tabla 6 resume el FS para todos los componentes en tres niveles del claro de los acoplamientos circulares. Como era de esperarse conforme el claro aumenta, el FS de la placa adaptadora se reduce.

EDICIÓN DIGITAL

ISSN 2448-5837

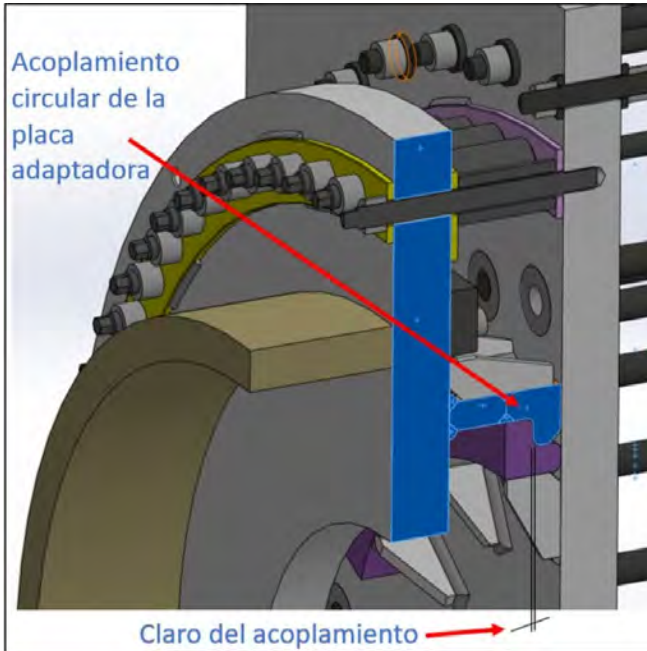


Figura 11. Claro entre acoplamientos circulares del concepto C

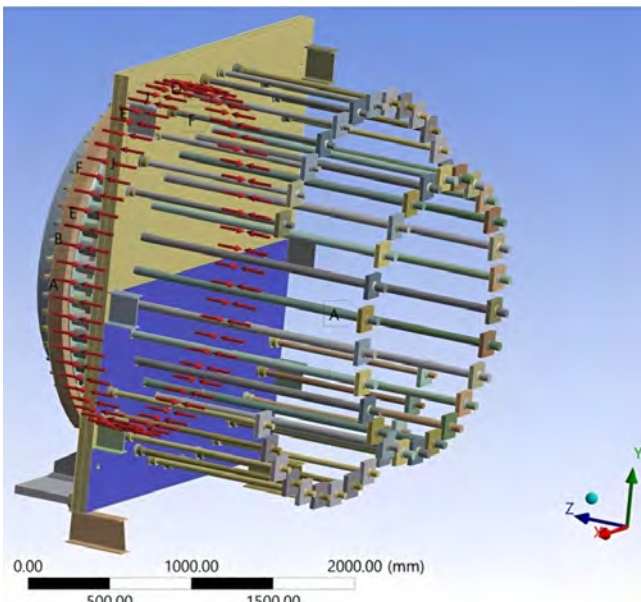


Figura 12. Placa base restringida en el eje Z por medio de una condición de sólo compresión (concepto C)

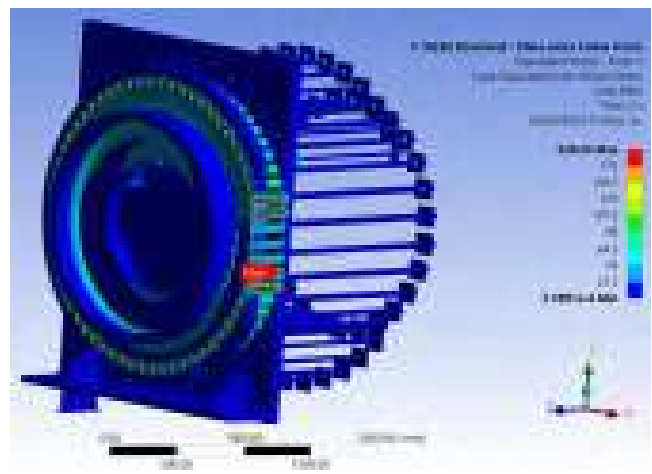


Figura 13. Esfuerzos de von Mises en los componentes del banco de ensayos para un claro de 0 mm

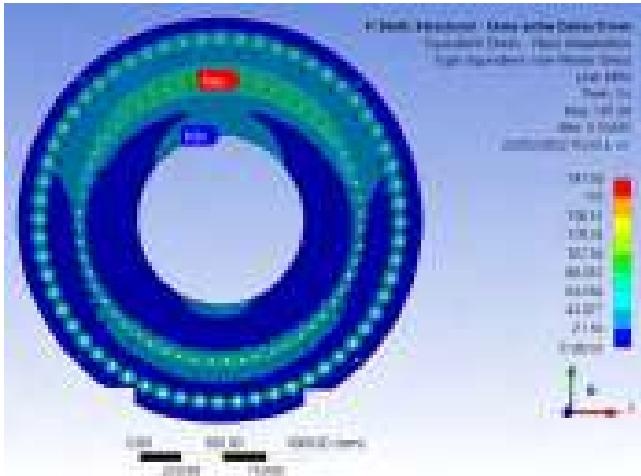


Figura 14. Esfuerzos de von Mises (172.5 MPa) placa adaptadora del banco de ensayos para un claro de 0 mm

Tabla 6. Resumen de factor de seguridad en el análisis por MEF

No	Componente	Factor de seguridad		
		Claro 0 mm	Claro 0.2 mm	Claro 0.5 mm
1	Placa base	2.00	2.02	2.04
2	Acoplamiento circular de la placa base	3.08	4.13	9.83
3	Cartabones de cuña inferior	3.01	2.71	3.62
4	Casquillos	2.52	2.38	2.21
5	Espárragos	2.36	2.46	2.65
6	Placa adaptadora	2.27	2.10	1.84
7	Acoplamiento circular de la placa adaptadora	4.14	5.13	8.03
8	Cartabones cuña superior	5.52	3.92	3.27

Por interpolación, la placa adaptadora alcanza un FS de 2 en un claro de 0.3 mm, el resto de los componentes presentarán mayor FS, de forma que un rango permisible de montaje puede ser definido entre un claro de 0 mm y 0.3 mm. El ensamble de las partes inició con el montaje del aspa en la placa adaptadora y después el montaje sobre los acoplamientos circulares. Posteriormente, se colocará el arreglo de 60 espárragos y se completará las cargas de prueba. Con el peso del aspa en el sistema, la placa adaptadora se desplaza en dirección “Z” conforme la franja café de 0.59 mm a 0.8 mm (Figura 16). En esta franja se ubican los casquillos separadores entre la placa adaptadora y la placa base. La placa base también se desplaza en “Z” en 0.128 mm. Es decir, en la zona de casquillos se tendrá una apertura adicional por el montaje del aspa entre placas y casquillo, en el rango de 0.68 mm (0.8-0.12) y 0.47 mm (0.59-0.12). Para lograr, el claro en los acoplamientos circulares entre 0 mm y 0.3 mm, debe usarse un claro máximo entre casquillos y placa adaptadora de 0.38 mm (0.68-0.3) y 0.17 mm (0.47-0.3). Este ajuste permitió llevar a un claro entre acoplamientos circulares máximo de 0.3 mm y 0 mm, cuando los espárragos sean apretados.

Los casquillos de la mitad inferior de la placa adaptadora fueron colocados con un ajuste deslizable, solo para su montaje. Por lo tanto, la siguiente secuencia de montaje fue requerida:

- a) Montaje de la placa adaptadora al aspa con el torque de apriete de diseño en los pernos tipo T
- b) Traslado del aspa-placa adaptadora
- c) Montaje del aspa-placa adaptadora a través de los acoplamientos circulares y el uso de un par de grúas

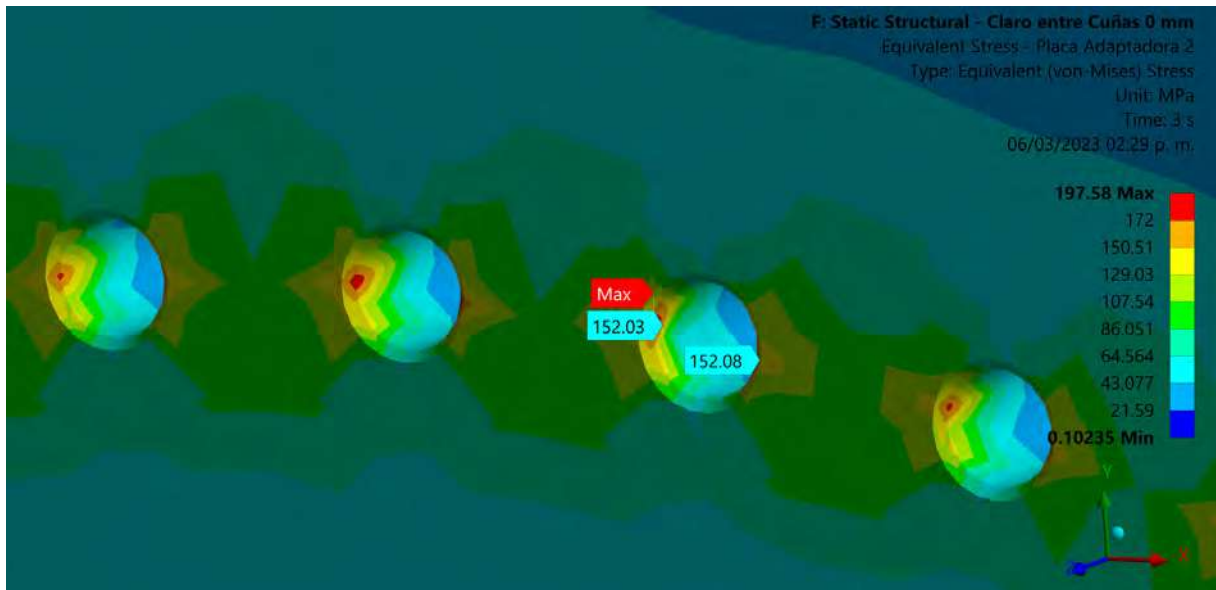


Figura 15. Singularidad de esfuerzo en barrenos de la placa adaptadora

- d) Montaje de casquillos inferiores en ajuste de deslizamiento
- e) Montaje de casquillos superiores con claro entre 0.38 mm y 0.17 mm
- f) Aplicar torque de apriete a todo el juego de espárragos en secuencia cruzada.

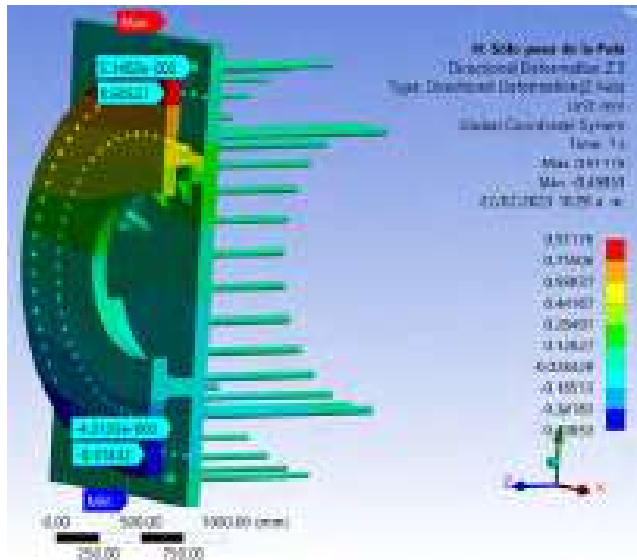


Figura 16. Desplazamiento del sistema bajo el peso del aspa

Geometría del bloque de reacción

Las dimensiones del bloque de reacción se determinaron considerando varios aspectos. Uno es el aspecto geométrico que lo determina el tamaño de la conexión entre la placa base y la placa adaptadora de la raíz del aspa. Otro aspecto es el arreglo y dimensiones de las anclas de la placa base al bloque de reacción. Un aspecto adicional de influencia es la resistencia estructural del elemento por las solicitaciones que se pudieran presentar. Por ejemplo, la revisión de estabilidad del elemento, la revisión de los esfuerzos producidos en el terreno y el diseño estructural del bloque de reacción. Con lo anterior las dimensiones establecidas para el bloque de reacción fueron las siguientes: bloque de reacción de 3.20 m x 2.85 m con una altura de 5.89 m que incluye un ángulo de 10°, cimentación de 6 m x 8 m con espesor de 0.70 m (Figura 17).

Instalación de estructura de apoyo para la placa base y anclas

Para el diseño de los anclajes de la placa base al bloque de reacción de concreto armado se siguió la referencia [11]. Para soportar la placa base durante la última fase de colado, se calculó una estructura metálica cuya función principal es sostener, nivelar y fijar la placa base durante el proceso de colado (Figura 18). Ya instalada la estructura de apoyo se coloca la placa base y las anclas (Figura 19), completando al final el armado como se muestra en la Figura 20. Finalmente se procede al vaciado de concreto para completar la última etapa de colado.

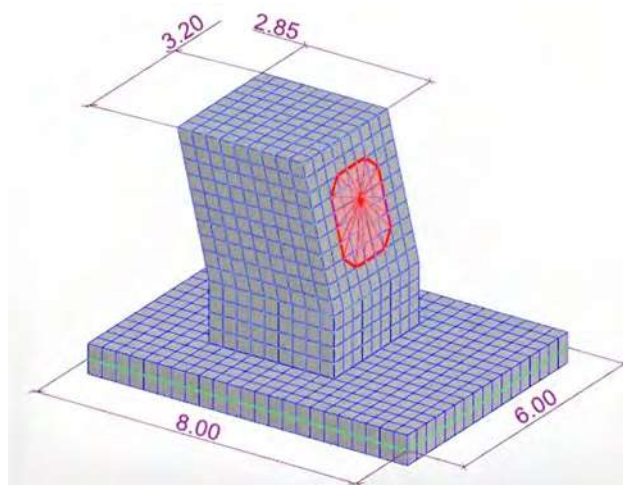


Figura 17. geometría del bloque de reacción y cimentación

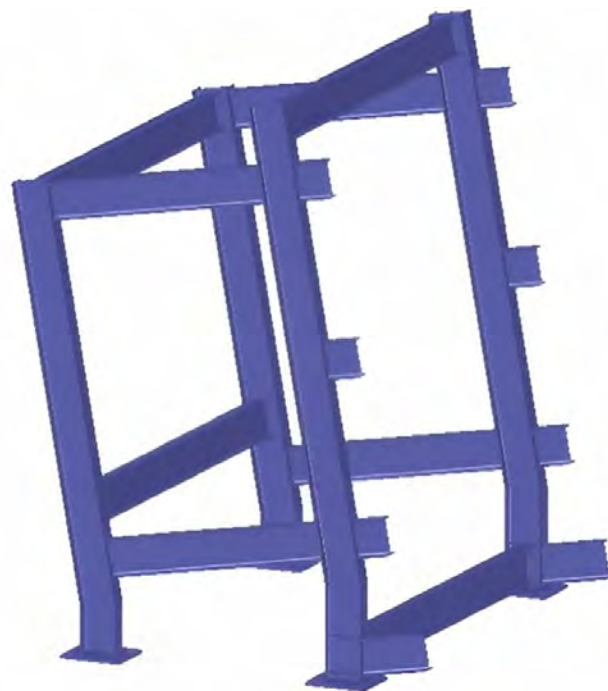


Figura 18. Estructura de apoyo para la placa base

Cargas de diseño.

En la tabla 1, se muestran las cargas requeridas para diseño aplicadas en la raíz del aspa. Para el diseño del bloque de reacción de concreto armado se consideró el momento máximo a flexión en el bloque de reacción indicado. Haciendo la conversión de MNm a tm, obtenemos las cargas de diseño. El momento máximo de flexión fue aproximado a 420 tm y el cortante máximo que incluye, el peso del aspa y los herramientas fue aproximado a 20 t. Estas cargas serán aplicadas en la unión entre la placa adaptadora y la placa base instalada en el bloque de reacción, como se indica en el modelo geométrico de la Figura 21.

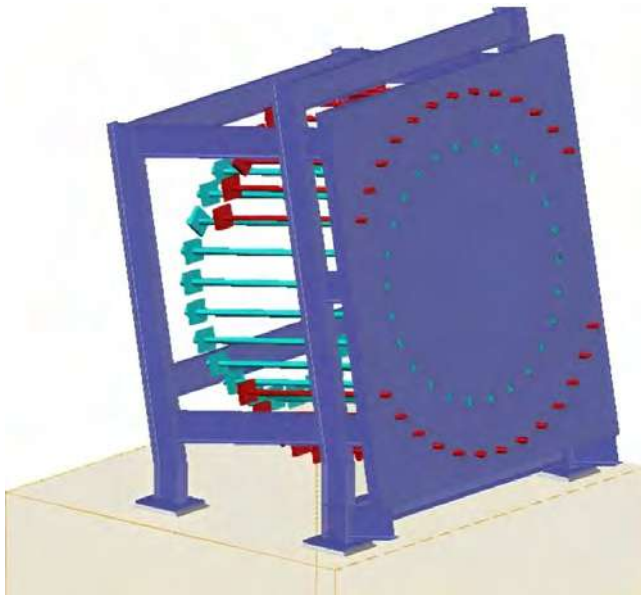


Figura 19. Colocación de placa base

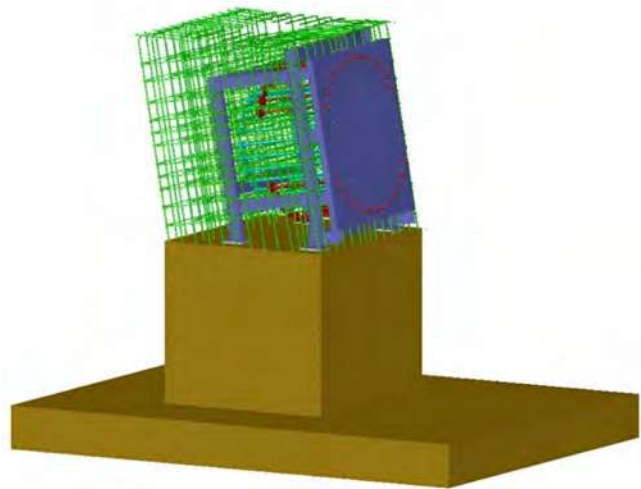


Figura 20. Estructura instalada para el colado final

Cálculo de estabilidad por volteo y esfuerzos sobre el terreno.

La capacidad de carga admisible se considera a una profundidad aproximada de 2 m del nivel de terreno natural con una capacidad de carga admisible de $q_{adm} = 21.20 \text{ t/m}^2$, esto de acuerdo con el estudio de mecánica de suelos. Para la revisión de la cimentación se consideró que cumpla con un factor de seguridad (F.S.) a volteo no menor que 2 y que los esfuerzos producidos sobre el suelo no sobrepasen la capacidad de la carga admisible q_{adm} .

Cálculo del acero de refuerzo en la cimentación.

Para el armado de la cimentación mínimo por flexión debe cumplir lo indicado en la sección 9.6 del ACI-318-19 [11]. En la Figura 22, se indica el área de acero donde se requiere colocar acero de refuerzo extra.

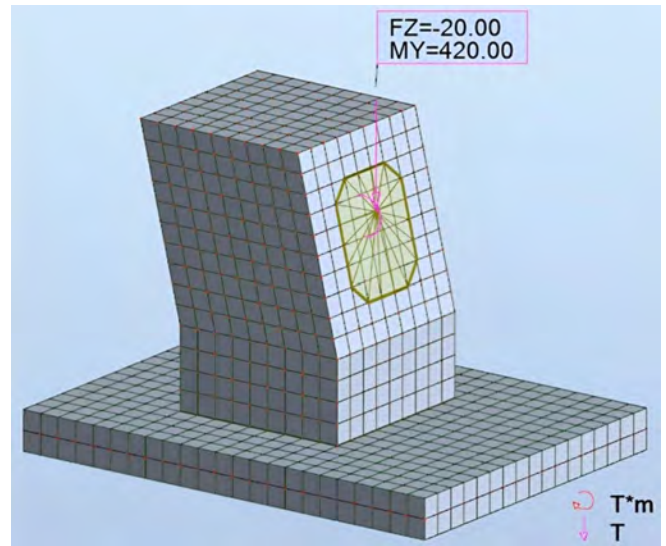


Figura 21. Momento y cortante aplicados en la raíz del aspa

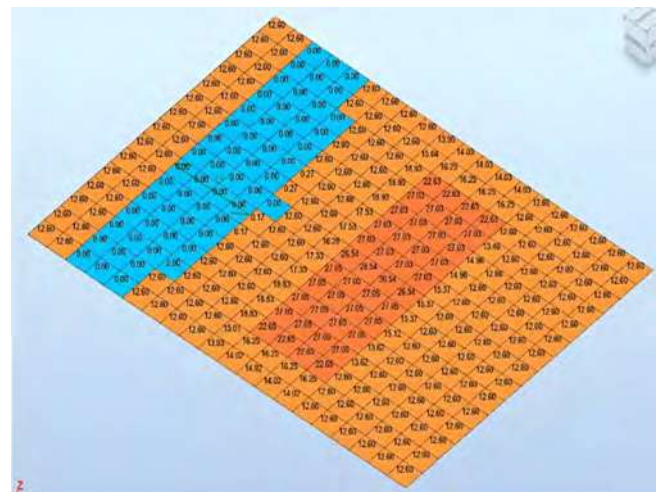


Figura 22. Área de acero obtenido del programa Robot Structural [12]

Cálculo del acero de refuerzo en el bloque de reacción.

En el ACI Capítulo 9 sección 9.6.1.2 [11] indica que el límite de refuerzo mínimo para una sección sometida a flexión. Tomando el acero mínimo por temperatura y revisando la sección como doblemente armada, obtendremos el momento resistente de la sección que deberá ser mayor al momento máximo que se presente en las diferentes sollicitaciones de diseño [13]. Donde se deberá cumplir la condición $\phi Mn \geq Mu$. (Figura 23).

Ingeniería de detalle

En esta etapa de diseño se realizaron los planos de montaje del bloque de reacción (Figura 24) y los planos de detalle de los herramientas de montaje del aspa (Figura 25). También quedaron seleccionados los componentes comerciales, así como la totalidad de las cotizaciones de materiales y servicios, para la completa definición de los planos de manufactura.

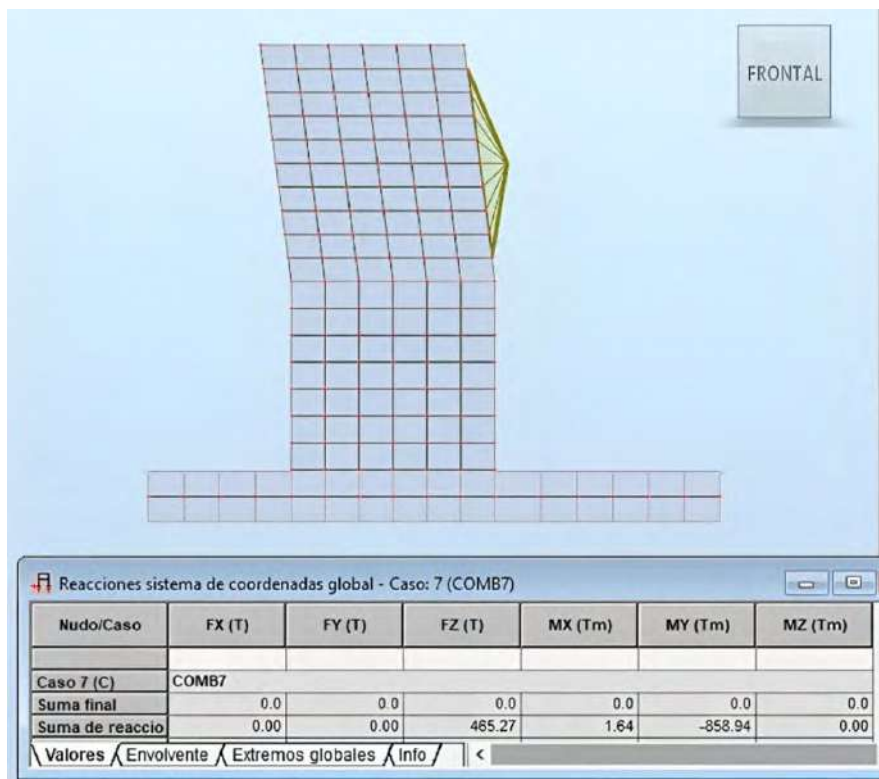


Figura 23. Momento máximo obtenido del programa Robot Structural [12]

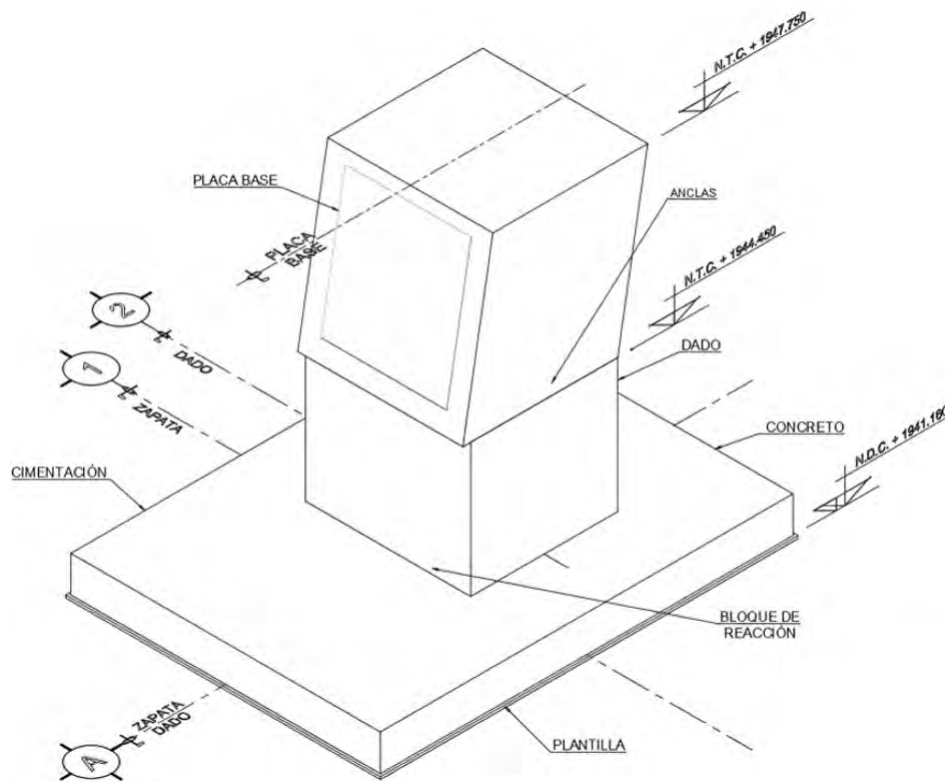


Figura 24. Vista en isométrico del bloque de reacción

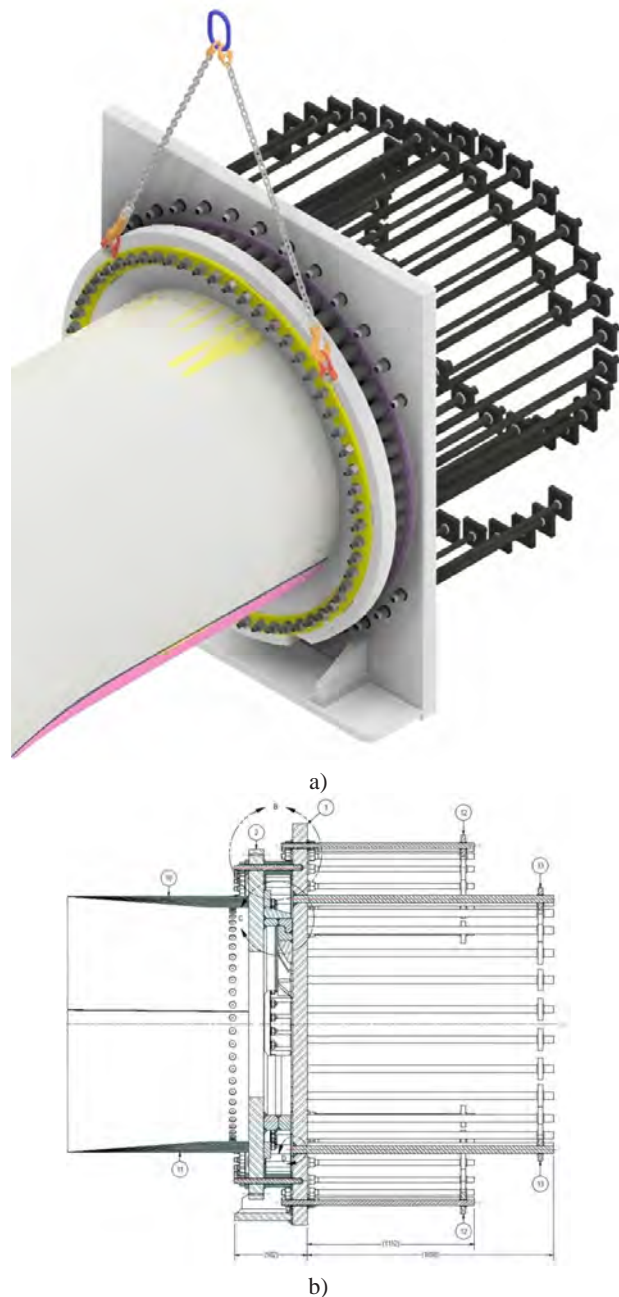


Figura 25. a) Montaje del aspa en el banco de ensayos b) Sección del ensamble del banco de ensayos

Manufactura, ensamble e implementación

La fabricación del bloque se realizó en tres partes, la primera corresponde a la cimentación (Figura 26a), diseñada para dar estabilidad al banco de pruebas al momento de presentarse las diferentes combinaciones de carga. Después, la segunda parte correspondiente a una parte del banco de reacción, transición entre la cimentación y la sección donde se conecta el aspa para los ensayos (Figura 26 b). Sobre la superficie horizontal de la segunda parte del banco de reacción, se desplantó la estructura para soporte, alineación, nivelado y fijación de la placa base. Finalmente, la tercera sección del banco de pruebas, que contiene la estructura soporte mencionada, los anclajes de la placa base en dos arreglos circulares, así como el refuerzo propio del

banco de reacción (Figura 26 c y d). Por separado se fabricó la placa base (Figura 27a), un elemento metálico de forma rectangular, el cual se integra al banco de pruebas y tiene la función de servir para conectar el aspa a través de la placa adaptadora con el banco de pruebas. La placa base tiene un peso de 5.50 t y también contiene 3 arreglos circulares de barrenos, dos de los cuales se utilizaron para el anclaje de la placa base al bloque de reacción y el otro para la conexión de la placa adaptadora. La placa adaptadora terminada es mostrada en la Figura 27b). La placa adaptadora fue ensamblada a la raíz del aspa, a través del montaje de los pernos tipo T y una herramienta hidráulica de aplicación de torque (Figura 28). Este ensamble fue transportado hacia el bloque de reacción para su montaje a través de dos grúas (Figura 29a y Figura 29b), para su ensamble mediante el arreglo circular de espárragos.

Resultados y conclusiones

La presente implementación fue pionera en el sector eólico, por lo que el banco de ensayos no solamente puede ser útil para la validación de reparaciones mayores, sino también en nuevos desarrollos de aspas. De forma específica se pueden listar las siguientes conclusiones:

- Los requisitos de diseño fueron validados a través del ensayo estático con la aplicación del momento de flexión máximo de 3.15 MNm en dirección flapwise+, como se observa en la Figura 30.
- El bloque de reacción de concreto reforzado fue fabricado sin el acceso cilíndrico conforme el concepto C y previamente propuesto en el concepto A. El concepto C permitió el montaje del aspa para su ensayo con el apriete de los espárragos por fuera del aspa. Durante la fabricación del bloque de reacción se cumplió con las especificaciones del diseño, las cuales fueron verificadas con las pruebas de resistencia tanto del concreto como del acero de refuerzo utilizado. El bloque de reacción cumplió con el factor de seguridad a volteo mínimo requerido y su cimentación permitió no sobrepasar la capacidad máxima de carga del terreno. Su refuerzo y la distribución de este permitieron albergar los dos arreglos circulares de anclas para fijación de la placa base al bloque, con la capacidad de carga requerida para soportar el aspa conectada mediante la placa adaptadora y sometida a las cargas de prueba estática.
- Durante el ensamble del conjunto aspa-placa adaptadora, fue necesario un ajuste fino de montaje para alineación de los barrenos de los espárragos, por lo que un sistema equivalente de ajuste fino deberá ser considerado en el procedimiento de montaje.
- Se confirmó que el diseño del banco de ensayos bajo un arreglo de espárragos y un acoplamiento circular evita las desventajas del ensamble en espacios confinados, lo cual representó una mejora con respecto a los bancos de ensayos de bajo costo revisados en el estado del arte.



Figura 26. Sección A-A del ensamble del banco de ensayos

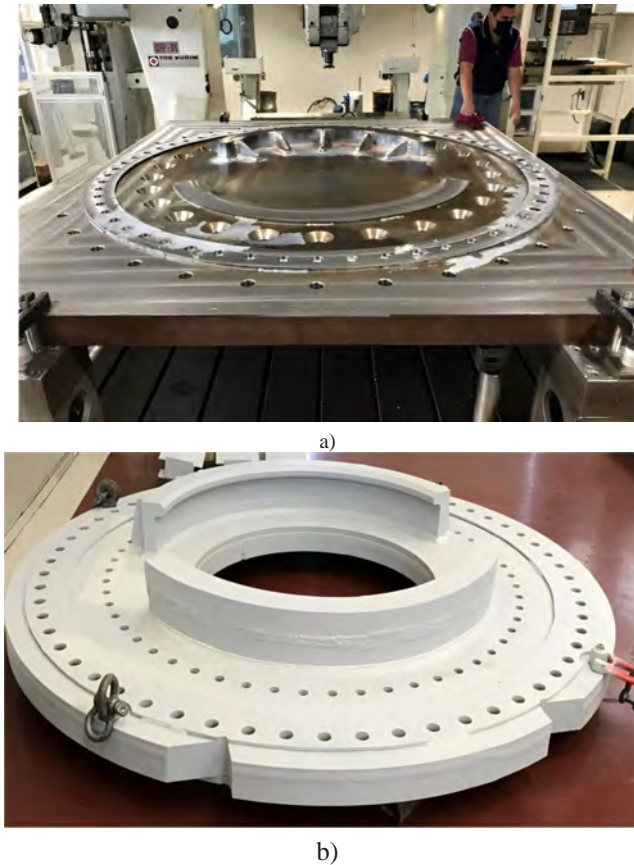


Figura 27. a) Maquinado de placa base, b) placa adaptadora terminada

Los resultados del ensayo del aspa flapwise+ fueron satisfactorios de acuerdo con la norma IEC 61400-23, pero debido al convenio de confidencialidad que se tiene con los Organismos de financiamiento y supervisión de este trabajo, no se dan a conocer los resultados detallados de la prueba realizada en el aspa.



Figura 28. Ensamble de placa adaptadora



a)



b)

Figura 29. a) Montaje de aspa al bloque de reacción con grúa b) Montaje del aspa en posición flapwise+

Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento al Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) como fuente de financiamiento haciendo posible el desarrollo de este proyecto, al Banco Interamericano de Desarrollo en su calidad de administrador y supervisor del Fondo BID/FMAM y al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias por la supervisión técnica y la confianza depositada en el equipo de trabajo.



Figura 30. Ensayo de flexión Flapwise+ de aspa

Referencias

- [1] DNVGL standard ST-0376, *Rotor Blades for Wind Turbines*. Edition 2015, DNV-GL, 2015.
- [2] IEC, IEC 61400-23, *Geneva 20: International Electrotechnical Commission (IEC)*. info@iec.ch, 2014.
- [3] AMDEE, «*El viento en números*,» Asociación Mexicana de Energía Eólica A.C “AMDEE”, 2018. [En línea]. Available: <https://amdee.org/el-viento-en-numeros.html>. [Último acceso: 07 03 2023].
- [4] Fraunhofer, «*Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems*,» Fraunhofer IWES, 2023. [En línea]. Available: https://www.iwes.fraunhofer.de/en/test-centers-and-measurements/qualification-of-composite-materials-and-components/Full_scale_blade_testing.html. [Último acceso: 17 01 2023].
- [5] CFM, «*ROTOR BLADE TEST RIG*,» CFM Schiller GmbH, 2023. [En línea]. Available: <https://www.cfm-schiller.de/en/test-rig-technology/rotor-blade-test-rig/>. [Último acceso: 17 01 2023].
- [6] U. O. MAINE, «*Wind Blade Testing*,» 2023. [En línea]. Available: https://composites.umaine.edu/wp-content/uploads/sites/600/2021/08/UMCompositesCenter-WindBladeTesting_rev8_2021-2.pdf. [Último acceso: 17 01 2023].
- [7] NREL, «*Our Accomplishments*,» NREL Transforming Energy, 2023. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/about/accomplishments.html>. [Último acceso: 17 01 2023].
- [8] U. 166002, *Gestión de la I+D+i: Requisitos del sistema de Gestión de la I+D+i*, Madrid, España: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2014, 2006.
- [9] ANSYS-Workbench, «*Mechanical User's Guide*,» 2023. [En línea]. Available: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/wb_sim/ds_Home.html.
- [10] M. Acin, «*Stress singularities, stress concentrations and mesh convergence*,» 02 06 2015. [En línea]. Available: <http://www.acin.net/2015/06/02/stress-singularities-stress-concentrations-and-mesh-convergence/>. [Último acceso: 06 03 2023].
- [11] ACI American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Comentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*, Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2019.
- [12] Autodesk, «*Autodesk® Robot™ Structural Analysis Professional 2010 Training Manual - Metric Version*,» Autodesk, USA and/or Canada, 2010.
- [13] Morales-Morales, *Diseño en concreto armado concordado a ACI-318*, Lima, Perú: Fondo editorial ICG, 2006.
- [14] GL, Germanisher Lloyd, GL, Edition 2010.