

Reporte de validación y recomendaciones al diseño preliminar propuesto por la empresa DFM Engineering[®] para el pedestal de acero que sostendrá a los telescopios del proyecto TAOS-2.

G. Sierra, M. Reyes, L. Figueroa.

Instituto de Astronomía. Universidad Nacional Autónoma de México.
Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, B. C., México.

RESUMEN:

La gerencia del proyecto TAOS-2 solicitó al Departamento de Instrumentación del IA-UNAM validar y, en su caso, dar recomendaciones para el diseño del pedestal de acero que sostendrá los telescopios del proyecto. La propuesta de diseño fue presentada por la empresa DFM Engineering[®].

En este documento mostramos los resultados de los análisis por elementos finitos realizados al diseño

propuesto, así como observaciones al mismo. Estos resultados fueron presentados en reuniones de trabajo del proyecto para su discusión.

El dictamen de validación y las recomendaciones fueron aceptados por la gerencia del proyecto, la empresa DFM Engineering[®] y la compañía Salazar Cálculo y Diseño, S.A de C.V. [®], quien realizó los trámites de gabinete de ingeniería civil.

Contenido

1. ANTECEDENTES	2
2. INTRODUCCIÓN	2
3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO PARA EL PEDESTAL PRESENTADA POR LA EMPRESA DFM ENGINEERING [®]	3
4. VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA DEL PEDESTAL	4
4.1 PREPARACIÓN PARA LOS CÁLCULOS DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	5
4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ESFUERZOS MECÁNICOS CON MATERIALES EN SU RANGO ELÁSTICO.	7
4.3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS: MODAL Y SUPERPOSICIÓN MODAL DEL PEDESTAL PROPUESTO.	9
5. RECOMENDACIONES DEL DEPARTAMENTO DE INSTRUMENTACIÓN DEL IAUNAM ACERCA DEL DISEÑO DEL PEDESTAL.	15
6. CONCLUSIONES DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DEL PEDESTAL PROPUESTO	15
7. REFERENCIAS	16
APÉNDICE A: PLANOS PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA DFM ENGINEERING [®]	18

1. ANTECEDENTES

El proyecto conocido como TAOS-2 (por sus siglas en inglés: Transneptunian Automated Occultation Survey) es una colaboración entre el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), el Instituto de Astronomía y Astrofísica de la Academia Sínica de Taiwán (ASIAA) y el Centro para Astrofísica de la Universidad de Harvard (CFA). Consiste en la construcción de tres telescopios robóticos de 1.3 m de diámetro en su espejo primario, con razón focal de $f/4$, un campo visual de 1.7 grados y una área de imagen de 0.15 m, en el Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir.

El principal objetivo científico del proyecto es la caracterización de los objetos en el sistema solar más allá de la órbita de Neptuno, que es uno de los temas principales de la astrofísica y de las ciencias planetarias modernas. El conocimiento de las propiedades de estos objetos transneptunianos encierra claves importantes para entender el origen del Sistema Solar y de otros sistemas planetarios.

La compañía DFM Engineering© ha sido la encargada del diseño, construcción y software de control de los telescopios, y sugirió un diseño de pedestal para soportar cada telescopio. La empresa Salazar Cálculo y Diseño© S.A. de C.V. está contratada para elaborar los trámites de gabinete de ingeniería civil.

La validación del desempeño mecánico del pedestal es el objeto de estudio del presente reporte, así como las recomendaciones emitidas por el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM para el diseño y manufactura del mismo.

2. INTRODUCCIÓN

Para evaluar la propuesta de diseño de los pedestales para los telescopios, presentada por la empresa DFM Engineering©, los responsables del proyecto TAOS II solicitaron al Departamento de Instrumentación del Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM), la realización de un estudio estático estructural de esfuerzos con la finalidad de conocer el comportamiento mecánico de los pilares tubulares de acero propuestos, así como hacer observaciones al respecto. El IA-UNAM realizó, además del análisis estático solicitado, los estudios de frecuencias naturales y de respuesta estructural a un espectro de vibración sísmica.

Los resultados obtenidos por parte del IA-UNAM sobre el desempeño mecánico se presentaron en reuniones de trabajo ante miembros del proyecto TAOS II, de los Departamentos de Instrumentación y de Obras del IA-UNAM, además de personal de la empresa DFM Engineering© y representantes de la empresa Salazar Cálculo y Diseño©, S.A. de C.V.

Los análisis presentados por el IA-UNAM validaban el diseño propuesto y fueron cotejados con los resultados obtenidos por los estudios de la empresa contratista, resultando similares, lo que daba mayor certeza a la validación y posterior aceptación del diseño conceptual presentado.

En este proceso de comparación de resultados, los parámetros cotejados fueron los siguientes:

- en los estudios estáticos, magnitud y localización de los esfuerzos y desplazamientos máximos
- en los análisis modales, el valor en hercios y los modos de vibración de la estructura
- se compararon los valores de los desplazamientos y esfuerzos máximos causados por la perturbación del espectro sísmico de la zona, obtenidos en el análisis de respuesta estructural a un espectro de vibraciones. Para este último estudio, lo más complicado fue la obtención del espectro sísmico de la Sierra de San Pedro Mártir [1 a 12].

La conclusión fue que, dado que los resultados presentados coincidían y ambos validaban la estructura mecánicamente, la estructura propuesta era apropiada estructuralmente para su fin. Sin embargo, a pesar de la aprobación estructural del diseño, el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM realizó varias observaciones que se presentarán más adelante en este mismo escrito.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO PARA EL PEDESTAL PRESENTADA POR LA EMPRESA DFM ENGINEERING®

La propuesta presentada para el pedestal constaba de un tubo monolítico de acero estructural A-36 con 600 pulgadas de alto, 96 pulgadas de diámetro y un espesor de pared de 0.5 de pulgada. En su parte superior tenía cortes y placas de refuerzo para la instalación de la base del telescopio. El pedestal se presentaba anclado por su parte inferior a la cimentación.

Los datos geométricos fueron tomados de varios dibujos proporcionados por la empresa constructora de los telescopios con autorización del proyecto TAOS II. (Ver Apéndice A, Figuras A1, A2 y A3).

Las monturas de los tres telescopios del proyecto son de tipo ecuatorial, los cuales se componen de 2 secciones: yugo y tubo del telescopio. Este último contiene las monturas que sustentan la óptica de los telescopios, a saber: los espejos primario y secundario, así como su instrumento.

En la propuesta presentada, cada montura de telescopio descansaba sobre una base que actuaba como interfaz entre el telescopio y el pedestal.

En la *Figura 1* se muestra el modelo del pedestal en CAD, así como detalles de la parte superior del mismo. También se identifica la superficie del lomo del yugo (plano donde se encuentra el centro de masa del tubo del telescopio, según datos de la compañía constructora).

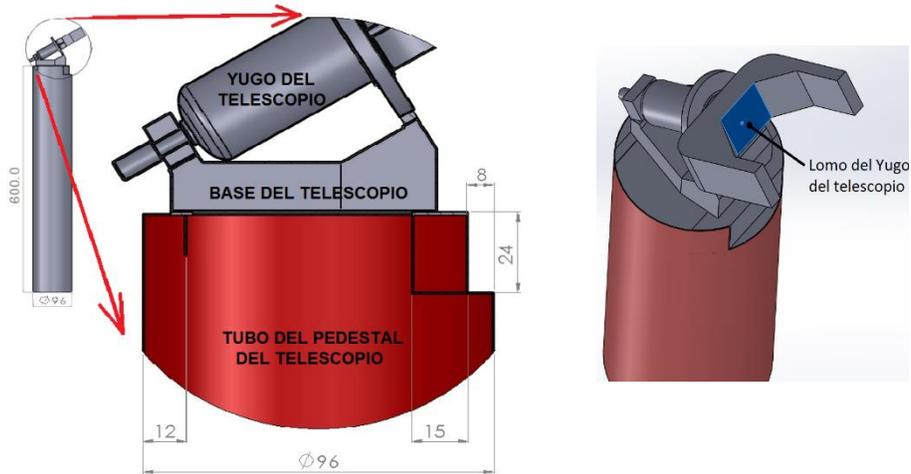


Figura 1: La configuración general de la propuesta del pedestal para los telescopios se presenta al lado izquierdo; al centro, detalle de la parte superior del pedestal y, en el inserto de la derecha, tenemos identificado el lomo del yugo.

Tenemos que mencionar que los datos geométricos de las monturas del tubo del telescopio no fueron proporcionados bajo el argumento de que no estaban totalmente diseñados y que los datos geométricos de la base del telescopio y del yugo eran suficientes para transmitir las cargas y momentos sobre el pedestal. El peso aproximado y el lugar físico del centro de gravedad del mismo sí estaban reportados.

A pesar de la solicitud, por parte del Departamento de Instrumentación del IA-UNAM, de que esa información fuera proporcionada (aún en estado preliminar) para un mejor análisis mecánico, la empresa se negó a proporcionarla. Este hecho nos llevó a que, en lugar de poner la geometría del tubo del telescopio con sus accesorios en las simulaciones realizadas, se colocara un nodo de masa equivalente a su peso en el centro de gravedad del mismo, tal y como lo sugirió la empresa.

Los datos reportados por la compañía fueron: 11,023.0 libras para el peso del tubo del telescopio aplicado en el centro de la parte inferior del lomo del yugo. Esta información fue proporcionada directamente por los miembros de DFM Engineering[®].

4. VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA DEL PEDESTAL

Para evaluar el desempeño mecánico de los pedestales, el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM realizó los siguientes estudios de ingeniería mecánica a los pilares tubulares de acero propuestos:

1. Análisis estático estructural de esfuerzos y deformaciones con materiales trabajando en su intervalo elástico.
2. Análisis de las frecuencias naturales conocido como análisis modal.
3. Desempeño estructural sometido a un espectro sísmico de vibraciones, también conocido como análisis de superposición modal.

El primero de los análisis hace uso de las ecuaciones de mecánica de materiales para encontrar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre el tubo propuesto.

El segundo y tercer análisis se refieren al estudio de vibraciones mecánicas para determinar las frecuencias naturales, los modos de vibrar y así determinar la respuesta estructural a las fuerzas repentinas o de choques, como las de un terremoto. Durante un sismo se transmiten oscilaciones violentas a la estructura desde los puntos donde está anclada al suelo, para ello se utiliza información histórica de terremotos del lugar donde se instalarán los telescopios.

Los estudios mencionados fueron realizados mediante el método de elementos finitos. Éste es un procedimiento numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales que consiste en considerar al cuerpo o estructura dividido en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculo entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelve numéricamente.

4.1 PREPARACIÓN PARA LOS CÁLCULOS DEL ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

La discretización del pedestal se realizó con la técnica de malla automática que consulta los resultados. La generación correcta de la malla en elementos finitos es importante para la obtención de resultados precisos y fiables. La malla de nuestro dominio fue refinándose en iteraciones, donde las variables de evidencia eran desplazamiento y esfuerzo máximo, y se fundamentaban en que las variables de evidencias tendieran asintóticamente a un resultado. Nuestro dominio incluía, además del pedestal, la base y el yugo del telescopio.

El modelo mallado se constituyó con elementos tipos ladrillos isotrópicos que definían 125,731 nodos. Las propiedades mecánicas del tubo fueron las del acero estructural ASTM-A36 y, para el resto del modelo, las del acero AISI-1018, dado que estos materiales se sugerían en la propuesta. Las condiciones de frontera utilizadas fueron del tipo restricción total -en traslación y rotación- aplicadas en todos los nodos inferiores del modelo, a saber: todos los nodos que tocarían la superficie de anclaje dado que el único contacto que presentaría el sistema mecánico analizado sería en su parte inferior. Además, se aplicó un nodo de masa de 11,023.0 libras, que era equivalente al peso del tubo del telescopio, localizado en su centro de gravedad, coincidente con el centro del "lomo" del yugo, como ya se mencionó. Ver *Figura 2*.

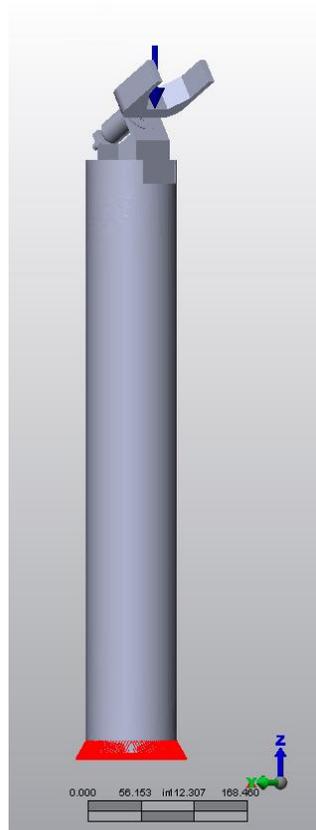


Figura 2: Modelo usado para el análisis por elementos finitos. En la parte del yugo se distingue una flecha indicando el nodo de masa equivalente al tubo del telescopio y la dirección del vector gravedad. En la sección inferior se muestran las condiciones de frontera.

Todos los análisis de desempeño mecánico de la propuesta del pedestal se realizaron con el mismo modelo y usando el sistema inglés de unidades, dado que la compañía proponente maneja este sistema, y nuestros resultados se cotejarían con los de las empresas DFM Engineering© y Salazar Calculo y Diseño S.A de C.V. en las reuniones de trabajo.

4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE ESFUERZOS MECÁNICOS CON MATERIALES EN SU RANGO ELÁSTICO.

Los resultados de este tipo de análisis dan los valores de los esfuerzos en libras/pulgada², y las deformaciones de las monturas, en pulgadas.

El esfuerzo máximo que presentaría el tubo del pedestal sería de 2,420.7 libras/pulgada², localizado en las esquinas internas de los cortes, en la parte superior del tubo.

Se muestran los resultados gráficamente en la *Figura 3*.

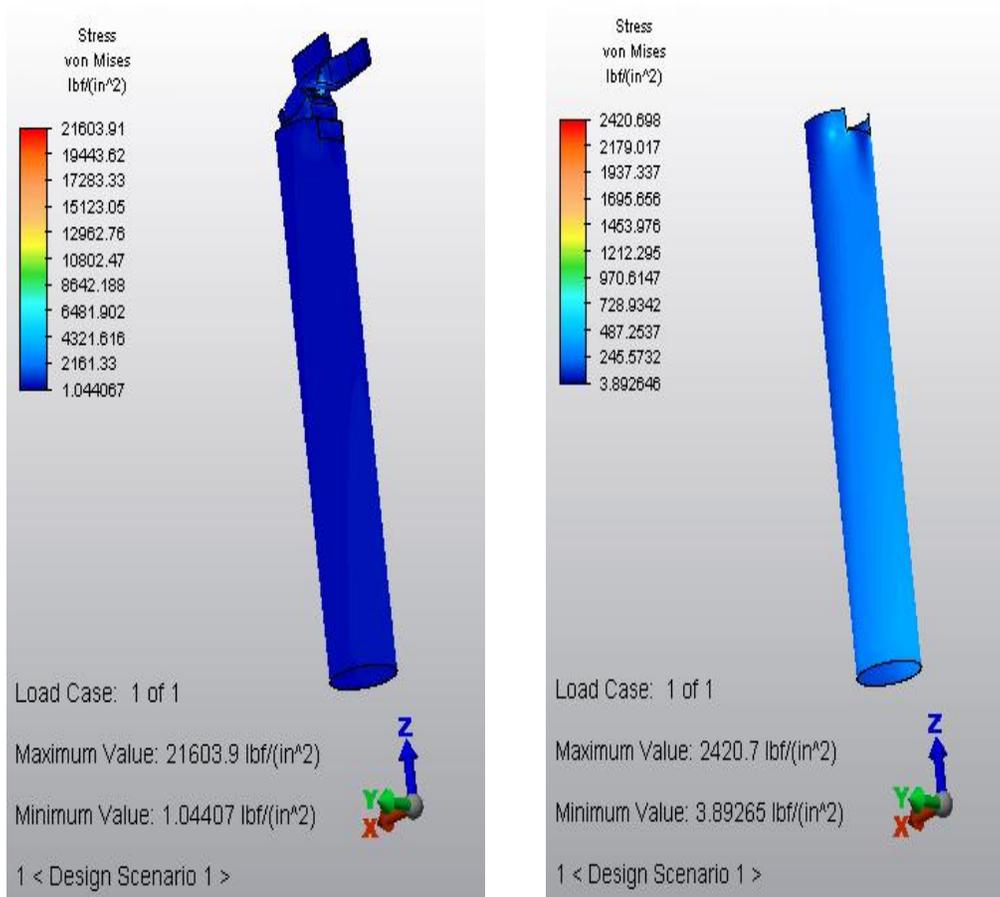


Figura 3: Resultados del análisis de esfuerzos de la propuesta de diseño. A la izquierda se presenta el modelo completo y a la derecha, únicamente el pedestal, que es nuestra materia de estudio.

El esfuerzo de cedencia o fluencia que presenta el material ASTM A-36 es de 36,300 libras/pulgada², por lo que el factor de seguridad es de 14.99 en el tubo. Este factor se puede considerar excesivo, sin embargo tenemos que ver el comportamiento en el peor escenario, que normalmente es el estudio de superposición modal.

La deformación máxima del tubo se muestra gráficamente en la *Figura 4*, su valor es de 0.019 plg y se localiza en la parte superior del tubo.

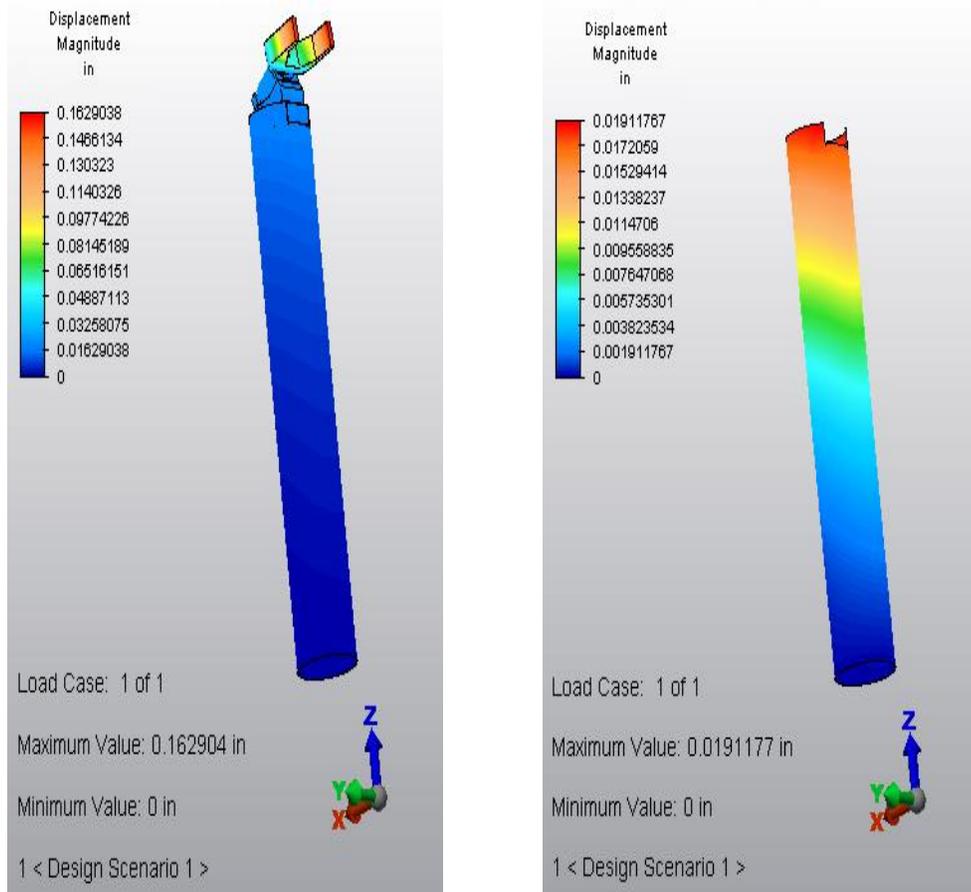


Figura 4: Resultados del análisis de desplazamientos del diseño propuesto. A la izquierda se presenta el modelo completo y a la derecha, únicamente el pedestal, que es nuestra materia de estudio.

4.3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS: MODAL Y SUPERPOSICIÓN MODAL DEL PEDESTAL PROPUESTO.

El análisis modal es complementario del de superposición modal. Los resultados de estos tipos de análisis son las frecuencias naturales en hercios (que son ciclos/segundo), los valores de los esfuerzos en libras/pulgada² y las deformaciones de las monturas en pulgada. Estos dos últimos, cuando la estructura entra en resonancia con la vibración inducida por el sismo.

Para estos estudios el factor de seguridad mínimo fue de 7.4, presente en la segunda frecuencia natural, donde el valor del esfuerzo máximo es de 4,908.96 libras/pulgada², localizado en su base. El mayor desplazamiento es de 0.214 pulgada y ocurre en la parte superior del tubo.

El desempeño del pedestal en el análisis de vibraciones mecánicas es satisfactorio por lo que el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM avala el diseño preliminar presentado por la empresa constructora.

En la Tabla 1 presentamos un resumen de los resultados obtenidos en estos estudios.

TABLA 1

Desplazamientos y esfuerzos del pedestal propuesto en sus cinco primeras frecuencias naturales presentes en caso de sismo.

Número de frecuencia natural	Valor de frecuencia natural [Hercio]	Descripción del modo de vibrar del pedestal	Desplazamiento máximo del pedestal debido al sismo. [Pulgada]	Esfuerzo máximos presentes en el pedestal debido al sismo. [libras/pulgada ²]/Factor de seguridad
1a	6.695	Oscilación de péndulo invertido en dirección NE-SO	0.216	4,402.96 / 8.3
2a	6.698	Oscilación de péndulo invertido en dirección NO-SE	0.217	4,908.69 / 7.4
3a	17.858	Movimiento torsional simple, péndulo de torsión	0.0018	145.38 / 251.7
4a	20.837	Movimiento armónico simple en dirección norte sur	0.0019	289.61 / 126.37
5a	36.511	Movimiento, ensanchamiento y contracción del tubo	0.0001	13.94 / 2,625.5

Las mayores deformaciones del pedestal se localizaron en la parte superior, y los esfuerzos máximos, en los nodos inferiores del modelo donde se ancla a la cimentación. La localización y los valores de los desplazamientos y esfuerzos para cada frecuencia natural los presentamos en forma gráfica en las Figuras 5 a 9.

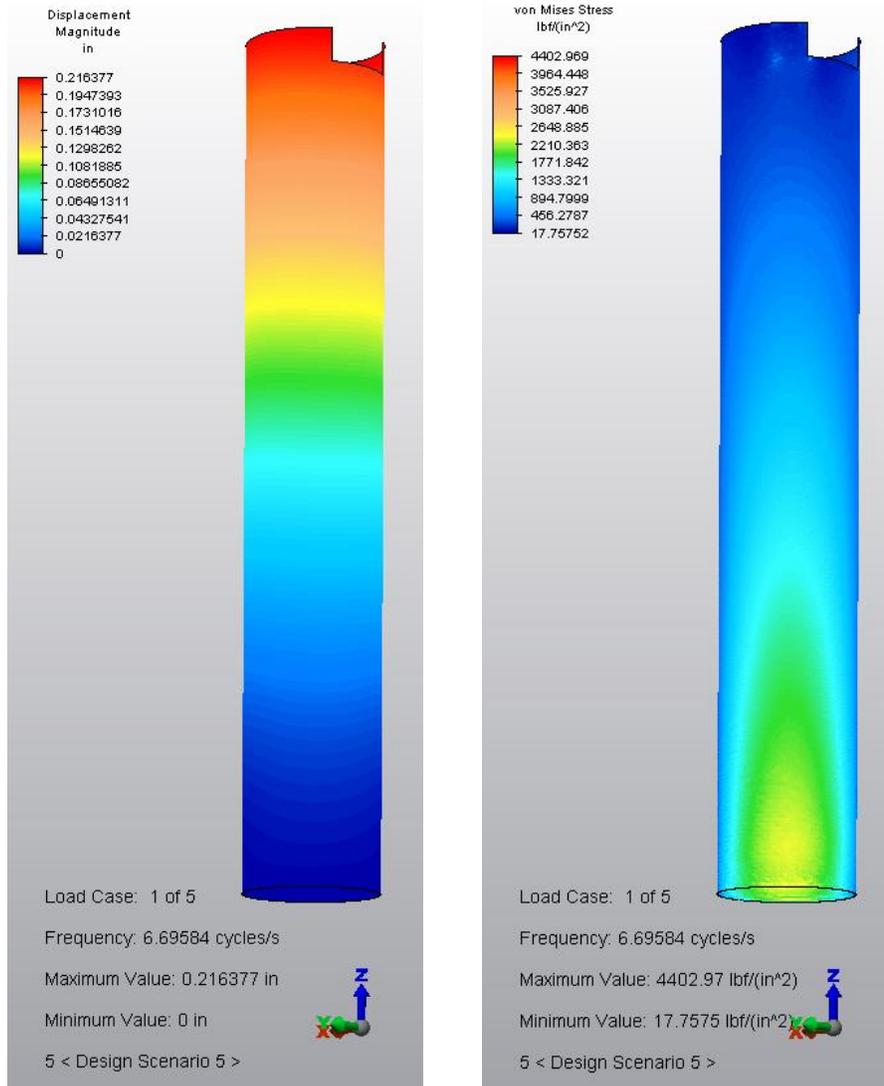


Figura 5: Desempeño mecánico del pedestal propuesto, en desplazamiento y en esfuerzo, cuando entra en resonancia en su primera frecuencia natural.

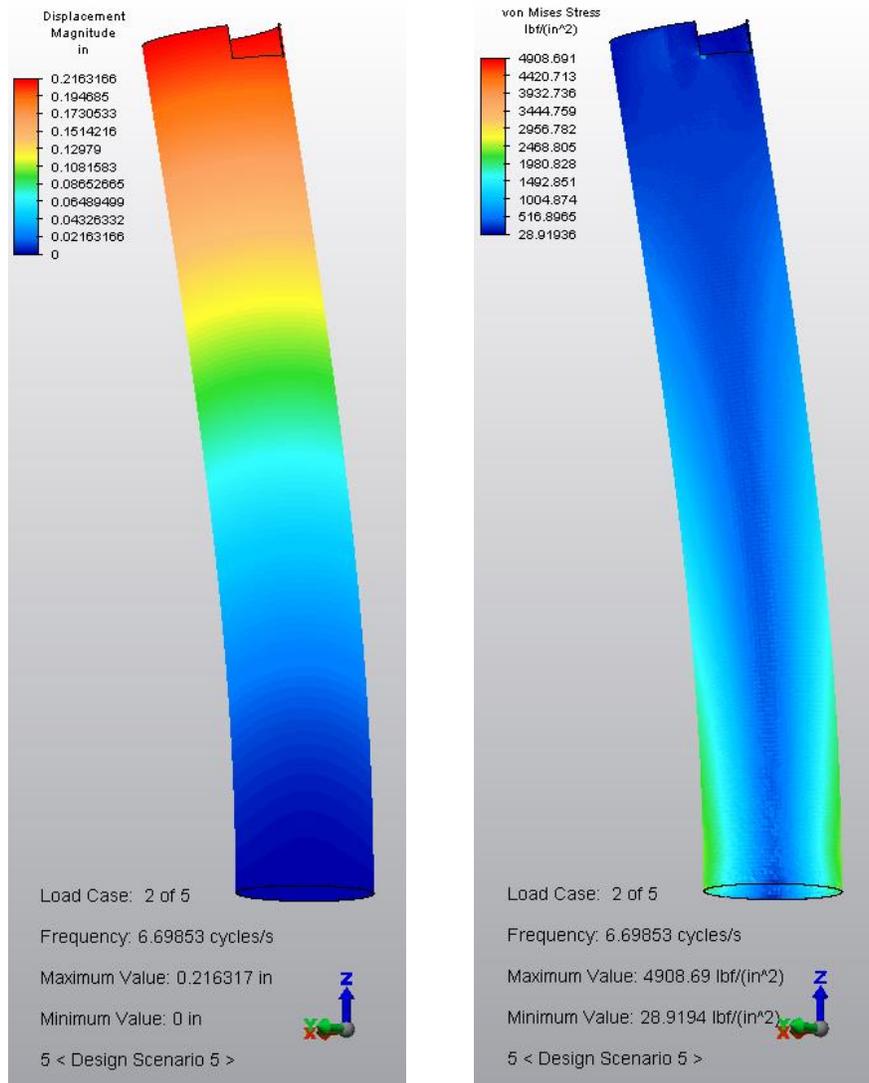


Figura 6: Desempeño mecánico del pedestal propuesto, en desplazamiento y en esfuerzo, cuando entra en resonancia en su segunda frecuencia natural.

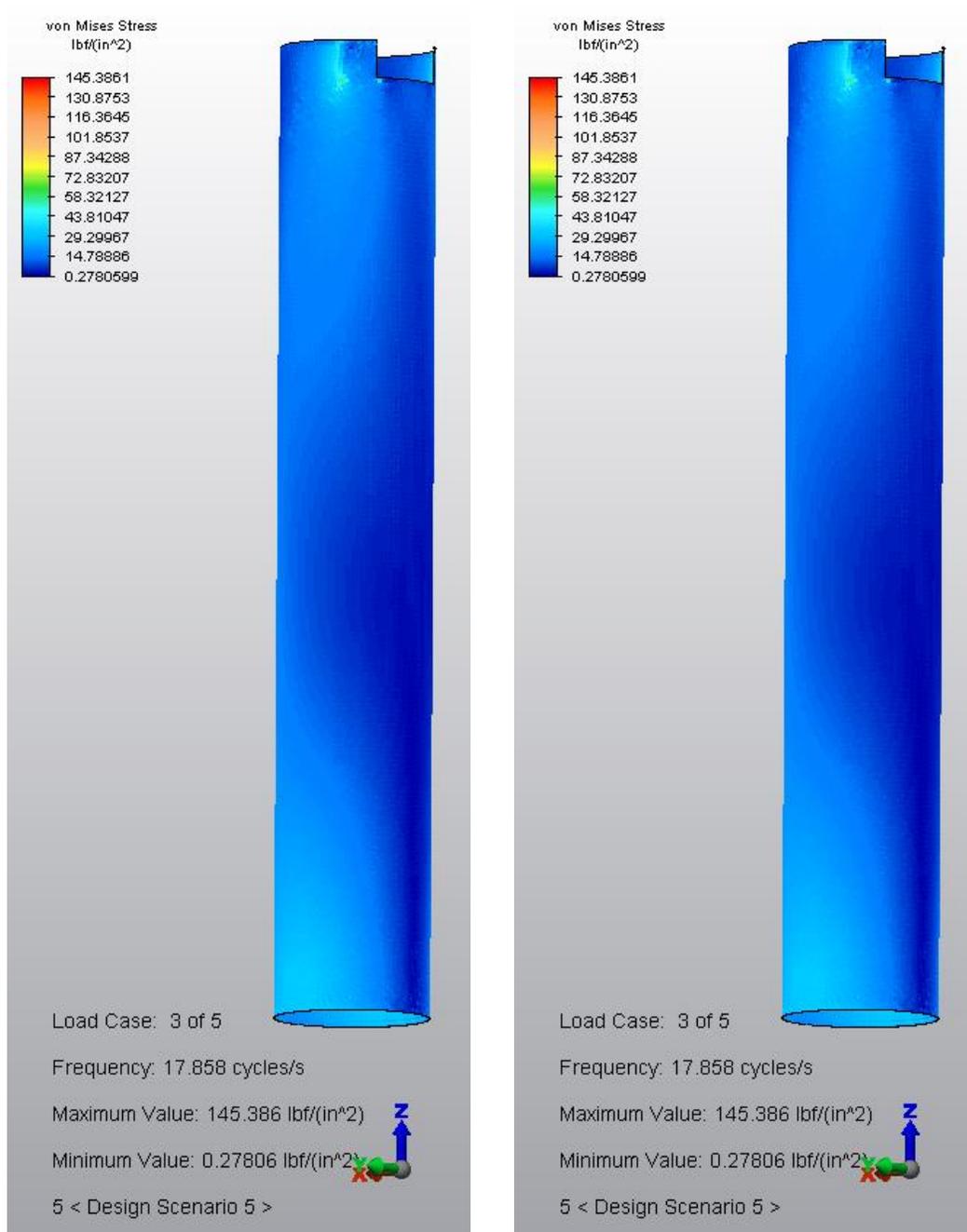


Figura 7: Desempeño mecánico del pedestal propuesto, en desplazamiento y en esfuerzo, cuando entra en resonancia en su tercera frecuencia natural.

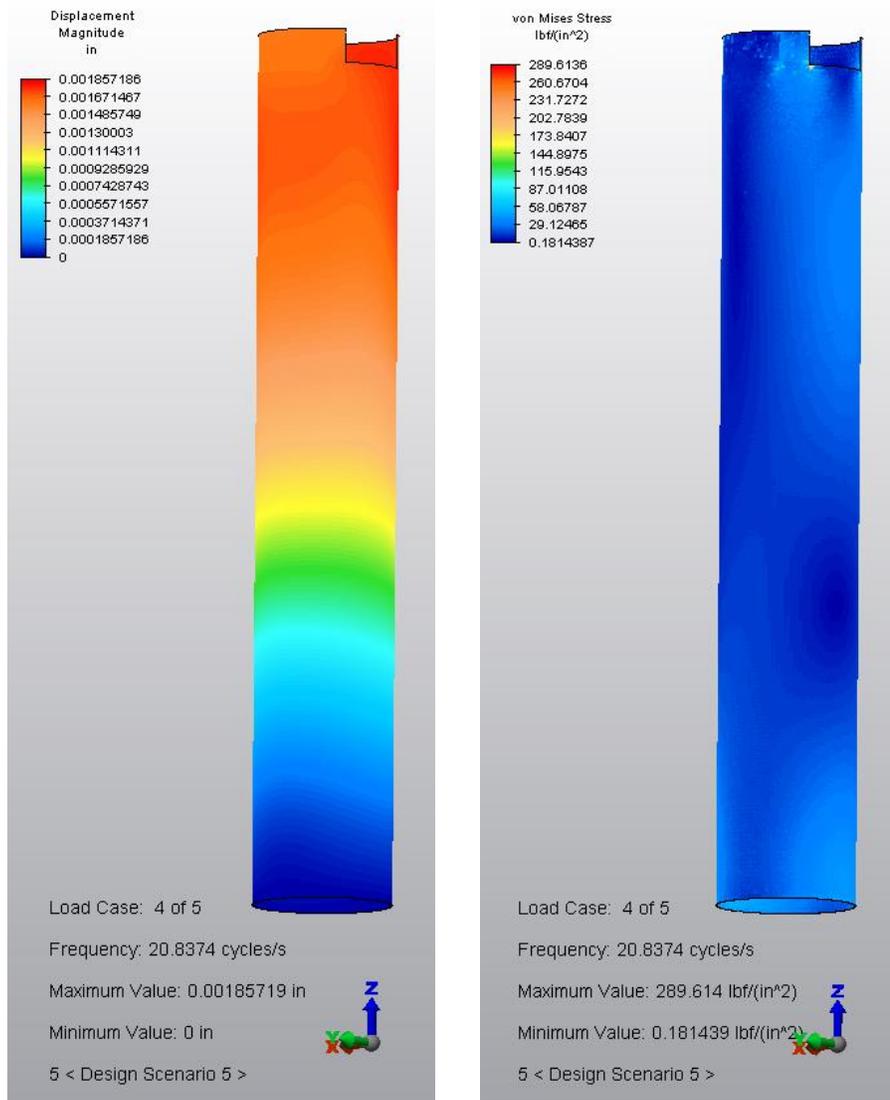


Figura 8: Desempeño mecánico del pedestal propuesto, en desplazamiento y en esfuerzo, cuando entra en resonancia en su cuarta frecuencia natural.

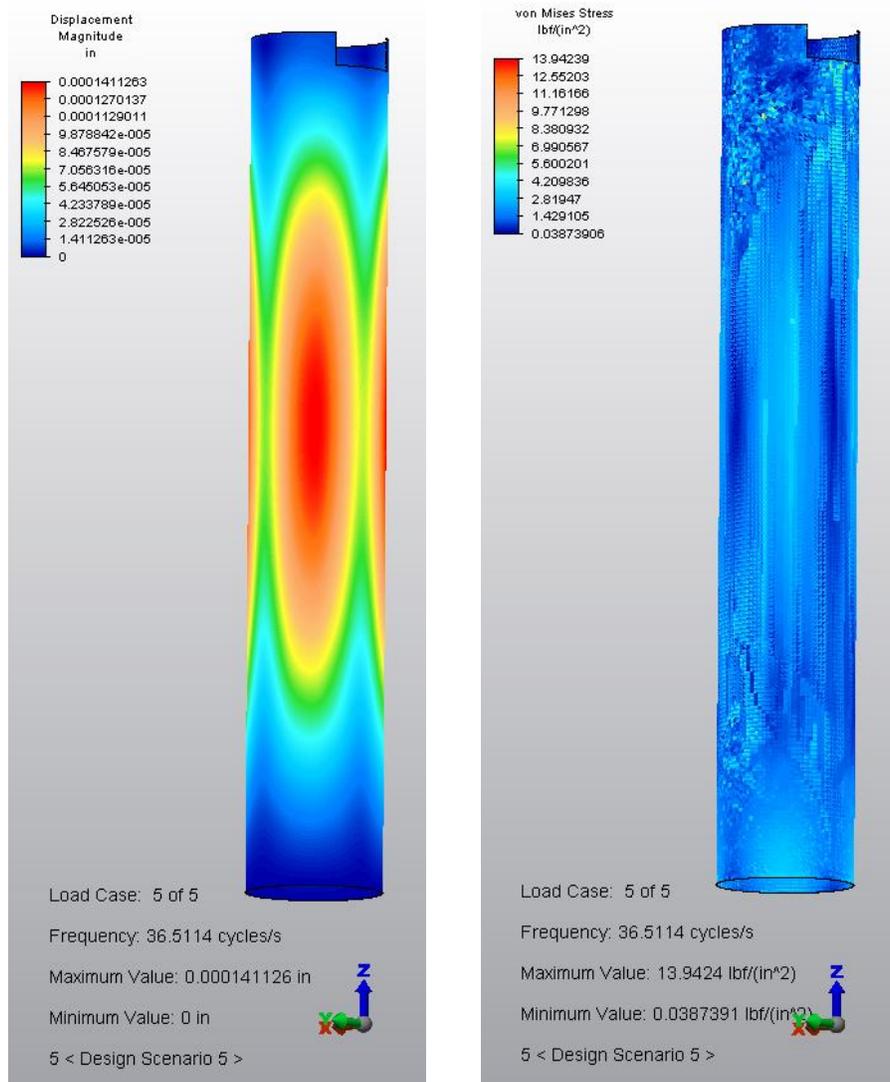


Figura 9: Desempeño mecánico del pedestal propuesto, en desplazamiento y en esfuerzo, cuando entra en resonancia en su quinta frecuencia natural.

5. RECOMENDACIONES DEL DEPARTAMENTO DE INSTRUMENTACIÓN DEL IAUNAM ACERCA DEL DISEÑO DEL PEDESTAL.

Las recomendaciones formuladas por el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM en relación al diseño y manufactura del pedestal propuesto, fueron formuladas considerando los resultados de los análisis presentados en este documento, y de acuerdo a las experiencias adquiridas y el conocimiento que tenemos del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir.

Las recomendaciones emitidas fueros las siguientes:

- Los resultados en el factor de seguridad indican un valor excesivo por lo que se comentó que el diseño preliminar propuesto estaba sobrado y permitía realizar un análisis para su optimización.
- Se sugirió que se disminuyera la altura del tubo del pedestal para incrementar su estabilidad mecánica y, especialmente, para facilitar la logística y transporte de los mismos al sitio: el camino para llegar al observatorio presenta curvas muy cerradas, pendientes pronunciadas y las camas de los camiones son de 40 pies de largo como estándar. Además los últimos kilómetros del camino son de terracería.
Se comentó que si la altura propuesta era resultado de un análisis de turbulencias atmosféricas y por lo tanto no era factible su disminución, se analizara la idea de seccionar el pedestal en tres segmentos, ensamblados por uniones tipo brida, para poder resolver el problema del transporte.
- Se recomendó diseñar una escalera para el interior del pedestal, ya sea de caracol o recta. Si se elige esta última, deberá contar con dos descansos, como mínimo, para incrementar la seguridad de la personas.
Si se decide la instalación de la escalera interna se deberá contar con un acceso al interior del pedestal por la parte inferior, al igual que al piso del telescopio.
- Se aconseja que la cimentación esté embebida en la piedra del sitio y aislar los cimientos del pedestal de los del edificio.
- El pedestal deberá tener contacto únicamente con sus cimientos. Se deberá tener especial cuidado en la interfaz entre el piso del telescopio, soportado por el pedestal, y el piso del telescopio, soportado por el edificio. Las vibraciones de la cúpula podrían interferir con la estabilidad de la imagen del telescopio.
- Se les ofreció el espectro del sismo en el sitio.
- Se propone que el edificio proteja el pedestal del viento para minimizar las vibraciones causadas por éste.

6. CONCLUSIONES DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DEL PEDESTAL PROPUESTO

La respuesta que el Departamento de Instrumentación del IA-UNAM ofreció a la gerencia del proyecto TAOS-2 es que los tres estudios realizados demostraron que el pedestal propuesto por la empresa DFM Engineering© presenta un desempeño mecánico válido para su función.

El dictamen de la validación, las recomendaciones y los resultados fueron aceptados por la gerencia del proyecto, por la empresa DFM Engineering© y por la empresa Salazar Cálculo y Diseño, S.A. de C.V., que realizó los trámites de gabinete de ingeniería civil. Como resultado, se modificaron algunos detalles del diseño presentado.

Tanto esas modificaciones como el diseño son autoría de la empresa constructora, de modo que todas las decisiones finales fueron tomadas por ellos y con este escrito no adquirimos autoría de los mismos. Únicamente se realizó la validación dado que la gerencia del proyecto deseaba asegurar el éxito de la empresa.

7. REFERENCIAS

- [1] Salazar Rodríguez, Ramón.
“Espectro de Diseño de San Pedro Mártir”
Salazar Cálculo y Diseño©
2012.
- [2] Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por Sismo)
2008.
- [3] Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
American Society of Civil Engineering.
ASCE 7-05. 2006.
- [4] Gámez Balmaceda, Ena del Carmen.
“Sismotectónica y efectos de sitio en la evaluación de la respuesta sísmica en Mexicali, Baja California”
2008.
- [5] Acosta Chang, José Guadalupe, et al.
“Microzonificación sísmica de Mexicali”
2007.
- [6] Cruz Castillo, Manuel
“Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México”
Instituto Mexicano del Petróleo.
2002.
- [7] Boore, D. M., Joyner, W. B. y Fumal, T. E.
“Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American Earthquakes: A summary of recent work.”
Seismological Research Letters. 68(1): p.128-152
1997.
- [8] Boore, D. M., Joyner, W. B.
“The empirical prediction of ground motion”
Bulletin of the Seismological Society of America. 72(6): p. s43-s60
1982.

- [9] Bazzurro, Paolo and Cornell, Allin.
“Disaggregations of Seismic Hazard”
1999.
- [10] Bertero, Raul, et al
“Criterios para construir el espectro de diseño elástico y seleccionar los sismos de diseño para un sitio dado”
- [11] Chan Dorado, Selma M., et al.
“Escalamiento de acelerogramas y número mínimo de registros requeridos para el análisis de estructuras”
2005.
- [12] Baker, Jack W.
“Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection”
2011.
- [13] DFM Engineering[©]
Planos preliminares: Pedestal ASSY DWG No 705-004, Observatory Building Section DWG No A-3, Round Steel Pier DWG No 705-P4.
- [14] Gere, James M.
Mecánica de Materiales
Ed. Thomson/Learning. 6ª edición.
ISBN 970-686-095-9

APÉNDICE A: PLANOS PROPORCIONADOS POR LA EMPRESA DFM ENGINEERING ©

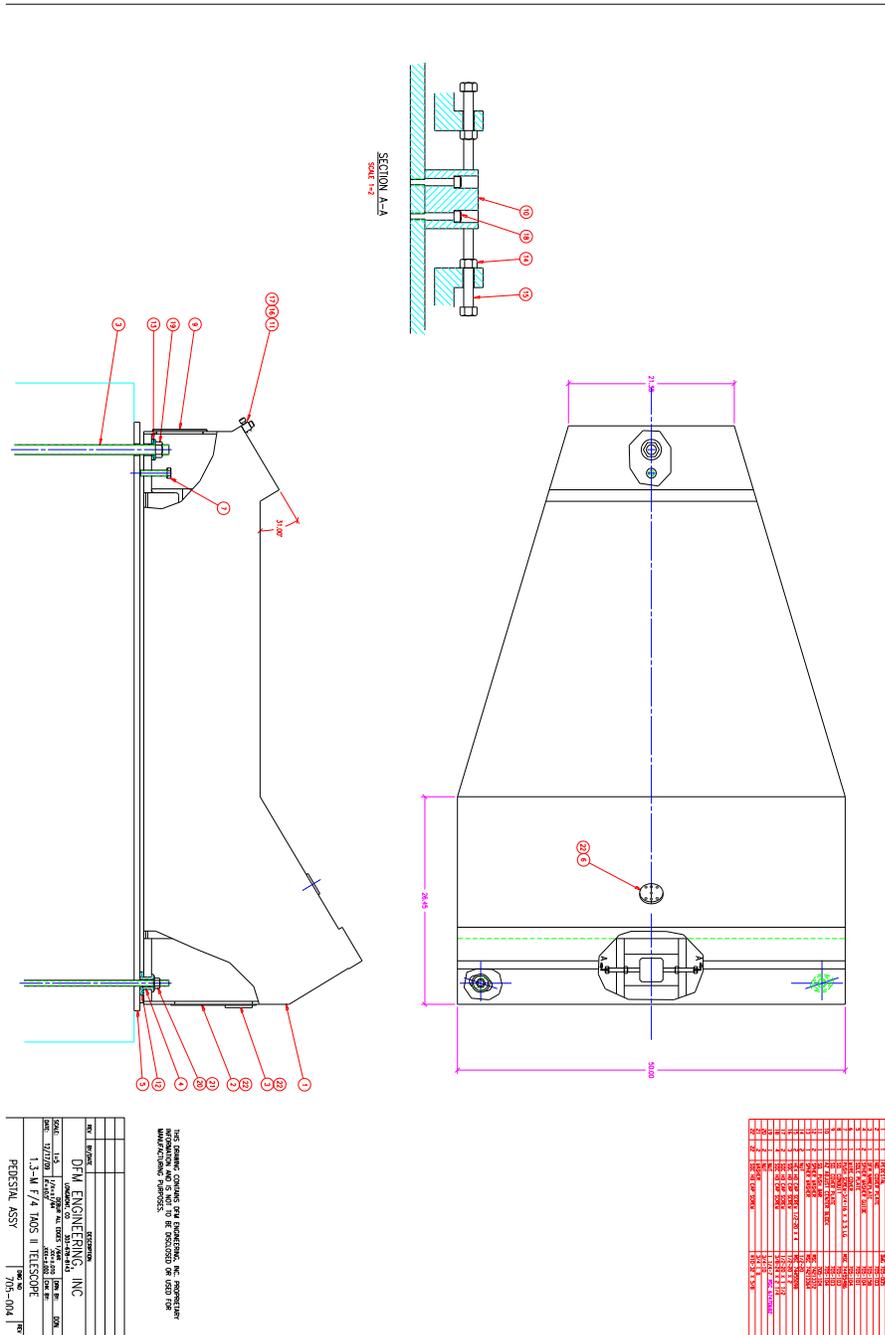


Figura A1: Plano de la base del telescopio de la empresa DFM Engineering ©

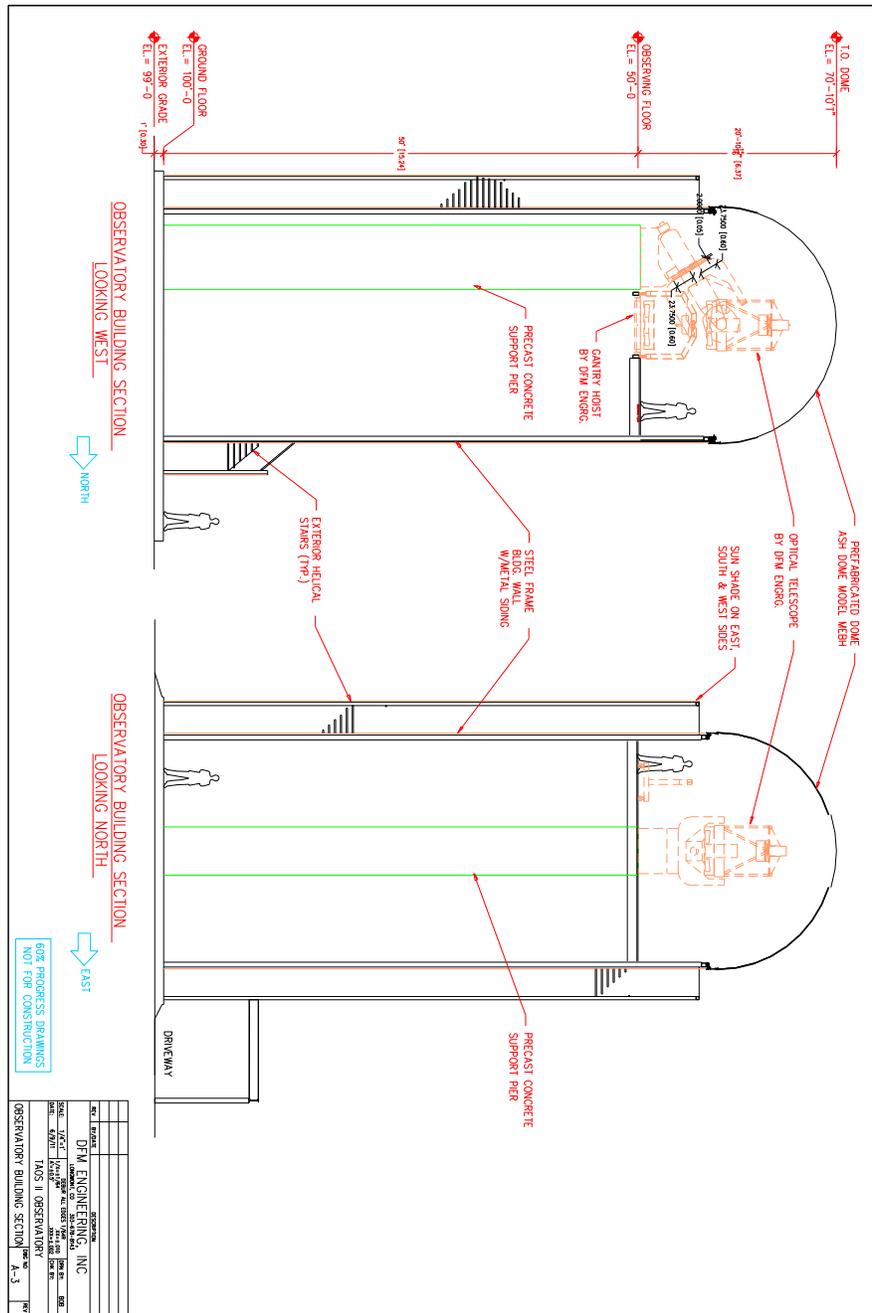


Figura A2: Primer plano del pedestal de la empresa DFM Engineering©

