

TITULO

**Análisis Estructural de la Cúpula del
GTC**

Código : EXT/GMU/0232-R
Edición : 2.A
Fecha : 08/05/2002
Nº de pág. : 145

Recibido por	Germán Pescadro Resp. Grupo de Edificio y Cúpula	Firmado en el original
Autorizado por	Pedro Alvarez Director de Proyecto	Firmado en el original
	Fecha:	22-05-2002

UTE GMU

Gran Telescopio CANARIAS

TÍTULO

ANÁLISIS ESTRUCTURAL
CÚPULA GTC

Código:	EXT/GMU/0232-R (Antiguo EXT/GMU/018-R)
Edición:	2A
Editado para:	Información
Fecha:	08-05-02
Nº de páginas:	143



IberEspacio

Tecnología Aeroespacial

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 4 de 145
---	--	--

Control de Aprobación

Preparado	M. Alcantud	
Revisado	A. Orden	
Aprobado	R. Manso	
Autorizado		

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 5 de 145
---	--	--

Control de Cambios

Edición	Fecha	Sección	Página	Descripción Cambios
1A	10-03-00	---	---	Edición inicial
2	12-03-02	Todas	Todas	Revisión general del documento

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 6 de 145
---	--	--

Documentos Aplicables

Nº	Título del Documento	Código	Edición
1	Dome Specification	ESP/EDIF/0040-R	2A
2	Matriz de Verificación	EXT/GMU/191-R	3A
3	Interfase Dome Telescope	DCI/STMA/0012-R	1C
4	Norma básica de la edificación	NBE-AE-88	

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 7 de 145
---	--	--

Documentos de Referencia

Nº	Título del Documento	Código	Edición
R1	Análisis estructural de la cúpula del GTC	GMU-1-CL-IE-003	1A

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 8 de 145
---	--	--

Siglas de configuración

Código	Descripción
DM-EN	Recinto de la cúpula
DM-EN-ST	Estructura de la cúpula
DM-EN-RS	Sistema de rotación de la cúpula
DM-EN-IP	Plataformas internas y accesos
DM-VD	Ventanas de ventilación
DM-VD-ST	Estructura de las ventanas de ventilación
DM-VD-MV	Accionamiento ventanas de ventilación
DM-SH-ST	Estructura de las compuertas de observación
DM-SH-MV	Accionamiento de las compuertas de observación
DM-WS	Pantalla antiviento
SE-TC-ZC	Grúa Zenit
SE-TC-HC	Grúa Boom

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 9 de 145
--	--	--

Lista de acrónimos y abreviaturas:

GTC Gran Telescopio Canarias

ORM Observatorio del Roque de los Muchachos

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 10 de 145
---	--	---

ÍNDICE

Página N°

1. OBJETO Y ALCANCE.....	12
2. DATOS DE PARTIDA	13
3. GEOMETRÍA Y M.E.F. DE LA CÚPULA	15
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA.....	15
3.2 M.E.F. DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA	16
3.3 MATERIALES	24
3.4 PESOS DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA.....	24
4. ANÁLISIS ESTÁTICOS	26
4.1 COMBINACIONES DE CARGA.....	26
4.2 CONDICIONES DE CONTORNO.....	29
4.3 ESTADOS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES	30
4.4 ESTUDIO DE LOS SOPORTES DE LAS GRÚAS BOOM Y ZENITAL Y DE SU INFLUENCIA SOBRE EL RESTO DE LA ESTRUCTURA.....	58
4.5 ANÁLISIS DE PANDEO	59
4.6 CARGAS EN LOS CARRETONES DE LA BASE DE LA CÚPULA	60
4.7 CARGAS EN LOS CARRETONES Y CADENAS DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN	61
5. ANÁLISIS DINÁMICOS	62
5.1 CONDICIONES DE CONTORNO.....	62
5.2 ANÁLISIS MODAL CON COMPUERTAS ABIERTAS	62
5.3 ANÁLISIS MODAL CON COMPUERTAS CERRADAS	64
6. MODELOS DE ANÁLISIS LOCALES.....	66
6.1 CARRIL DE RODADURA	66
6.2 VIGA DE RODADURA SOBRE VIGAS ARCO.....	73
6.3 PANTALLA DE PROTECCION ANTIVIENTO.....	75
6.4 ESTUDIO DE LAS CONTRAVENTANAS DE LA CÚPULA Y DEL EDIFICIO BASE FRENTE A PESO PROPIO Y VIENTO	79
6.5 TOPES EN VIGAS EN ARCO PARA AMORTIGUADORES DE LAS COMPUERTAS	80
6.6 ANCLAJE DE LOS AMORTIGUADORES A LA CÚPULA.....	81
6.7 SOPORTADO DE LAS CADENAS EN LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN.....	83
6.8 SOPORTADO DE MOTORREDUCTORES DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN	83
6.9 SOPORTES DE CADENAS A LA VIGA DE ARCO	84
7. CONCLUSIONES.....	86
Anexo A Figuras	
Anexo B	
B.1 Corrección del estado de tensiones de los elementos barra por pandeo	
B.2 Corrección de tensiones por taladros Ø 350 en el anillo base	
B.3 Estudio de los soportes de las grúas Boom y Zenital y de la influencia sobre el resto de la estructura	
B.4 Cargas en carretones de la base de la Cúpula	
B.5 Cargas en las cadenas de las compuertas de observación	
B.6 Cargas en los carretones de las compuertas de observación	
B.7 Estudio de la rigidez de las compuertas	
B.8 Topes en vigas arco y anillo base por los amortiguadores de la Cúpula	
B.9 Anclaje de los amortiguadores de la Cúpula	
B.10 Sistema de accionamiento de las Compuertas de observación. Soportado de cadenas en compuertas	
B.11 Sistema de accionamiento de las Compuertas de observación. Soportado de motorreductores y poleas	

Anexo C

- C.1 Análisis de la unión de los meridianos principales con los paralelos principales
- C.2 Análisis de la unión de módulos (meridianos secundarios)
- C.3 Unión meridianos secundarios
- C.4 Análisis de la unión de los paralelos secundarios con los meridianos principales
- C.5 Análisis de la unión de los meridianos secundarios con los meridianos secundarios
- C.6 Unión de los montantes de la celosía secundaria
- C.7 Análisis de la unión de los montantes y diagonales de los cordones de las celosías transversales de las compuertas de observación
- C.8 Análisis de la unión de los montantes y diagonales con los cordones de las celosías longitudinales de las compuertas de observación
- C.9 Unión de los meridianos principales con la viga de arco
- C.10 Cartelas interiores de la viga de arco
- C.11 Cartelas interiores de la viga anillo
- C.12 Unión soldada entre chapas del anillo base

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 12 de 145
---	--	---

1. OBJETO Y ALCANCE

El objeto de este documento es el presentar los resultados de los análisis estructurales realizados del conjunto de la estructura de la cúpula del Gran Telescopio de Canarias (GTC).

El objetivo es demostrar, mediante análisis, la validez de los diferentes componentes estructurales de la cúpula frente a diferentes estados de carga, de acuerdo a la norma básica de la edificación NBE-AE-88 y de la especificación de la Cúpula ESP/EDIF/0040-R, documentos aplicables 4 y 1 respectivamente.

Los componentes a analizar son la estructura principal de la cúpula, ventanas, compuertas de observación, carril de rodadura y pantalla antiviento, soportado de los mecanismos de actuación de la cúpula.

No es alcance de este trabajo el analizar el soportado del aislamiento interior, elementos y mecanismos de la cúpula como son carretones, cadenas de accionamiento de compuertas, grúas interiores, etc, pero sí justificar las interfases de estos componentes en su soportado con la estructura de la cúpula, demostrando que las máximas cargas que pueden transmitir no afectan a la integridad y estabilidad de la estructura a nivel local, ni a nivel global.

De igual forma, no es objeto de este trabajo el analizar el comportamiento térmico del conjunto de la estructura ni de la cúpula, ventilación natural, ventilación forzada, pinturas de acabado, etc.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 13 de 145
---	--	---

2. DATOS DE PARTIDA

- DP1 Plano DR/DM/001 hojas 1 (Ed. 1B), 2 (Ed. 1B), 3 (Ed. 1B). Disposición general de la Cúpula
- DP2 Plano DR/DM-EN/001 hojas 1 (Ed. 2B), 2 (Ed. 1B). Detalles apoyo de la Cúpula
- DP3 Plano DR/CW-EB/105 (Ed. 2B). Embebidos en Ménsula Superior y Ventanas del Edificio Base
- DP4 Plano DR/DM-EN-ST/011 (Ed. 2A). Viga Carril Cúpula y Anillo de Rodadura
- DP5 Plano DR/DM-EN-ST/021 hojas 1 (Ed. 2A), 2 (Ed. 2B), 3 (Ed. 2A). Anillo Base detalles
- DP6 Plano DR/DM-EN-ST/031 (Ed. 2A). Disposición paralelos y meridianos principales
- DP7 Plano DR/DM-EN-ST/032 (Ed. 2A). Definición de meridianos principales
- DP8 Plano DR/DM-EN-ST/033 hojas 1 (Ed. 2A), 2 (Ed. 1B). Definición de paralelos principales. Tramos de 16.5° y 15°
- DP9 Plano DR/DM-EN-ST/034 (Ed. 2A). Unión de meridianos y paralelos principales
- DP10 Plano DR/DM-EN-ST/041 hojas 1 (Ed. 2B), 2 (Ed. 1B). Viga superior de cierre
- DP11 Plano DR/DM-EN-ST/051 hojas 1 (Ed. 2B), 2 (Ed. 1B), 3 (Ed. 1B). Viga de arco
- DP12 Plano DR/DM-EN-ST/052 (Ed. 1B). Viga de arco tramos 1A y 1B
- DP13 Plano DR/DM-EN-ST/053 hoja 1 (Ed. 1B), hoja 2 (Ed. 1A), hoja 3 (Ed. 1A), hoja 4 (Ed. 1A), hoja 5 (Ed. 1A). Vigas con arco tramos 2A y 2B
- DP14 Plano DR/DM-EN-ST/054 hoja 1 (Ed. 1A), hoja 2 (Ed. 1A). Viga con arco tramos 3A y 3B
- DP15 Plano DR/DM-EN-ST/055 (Ed. 1A). Viga de arco tramos 4A y 4B
- DP16 Plano DR/DM-EN-ST/056 (Ed. 1A). Viga de arco tramos 5A y 5B
- DP17 Plano DR/DM-EN-ST/057 hoja 1 (Ed. 1B), hoja 2 (Ed. 1C), hoja 3 (Ed. 1A). Viga de arco, tramos 6A y 6B
- DP18 Plano DR/DM-EN-ST/061 (Ed. 2A). Viga de cierre inferior
- DP19 Plano DR/DM-EN-ST/071 hoja 1 (Ed. 2A), hoja 2 (Ed. 2A), hoja 3 (Ed. 2A), hoja 4 (Ed. 1B). Distribución de módulos
- DP20 Plano DR/DM-EN-ST/072 hoja 1 (Ed. 2A), hoja 2 (Ed. 1B). Detalle módulo típico

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 14 de 145
---	--	---

- DP21 Plano DR/DM-EN-ST/073 hoja 1 (Ed. 1B), hoja 2 (Ed. 1B), hoja 3 (ED. 1A). Definición Ventanas
- DP22 Plano DR/DM-EN-ST/074 (Ed. 1A). Detalles Varios
- DP23 Plano DR/DM-EN-ST/075 hoja 1 (Ed. 1B), hoja 2 (Ed. 1B), hoja 3 (Ed. 1B), hoja 4 (Ed. 1B). Faldones inferiores de la cúpula
- DP24 Plano DR/DM-SH-ST/001 hoja 1 (Ed. 2A), hoja 2 (Ed. 1B), hoja 3 (Ed. 1B), hoja 4 (Ed. 1A), hoja 5 (Ed. 1A), hoja 6 (Ed. 1A), hoja 7 (Ed. 1A), hoja 8 (Ed. 1A), hoja 9 (Ed. 1B), hoja 10 (Ed. 1B). Compuertas de observación
- DP25 Plano DR/DM-EN-IP/001 hoja 1 (Ed. 1B), hoja 2 (Ed. 1B), hoja 3 (Ed. 1A). Plataformas interiores
- DP26 Plano DR/DM-WS/001 hoja 1 (Ed. 2C), hoja 2 (Ed. 2D), hoja 3 (Ed. 1D). Pantalla antiviento
- DP27 Plano DR/SE-TC-ZC/001 (GMU-1-OS-MA3-010) (Ed. 2D). Grúa Zénit. Cotas generales
- DP28 Plano DR/SE-TC-HC/001 (Ed. 2E). Grúa Boom. Cotas generales
- DP29 Plano DR/DM-VD-ST/002 hoja 1 (Ed. 2B), hoja 2 (Ed. 1B), hoja 3 (Ed. 1A), hoja 4 (Ed. 1A). Contraventanas de la cúpula
- DP30 Fax (17/2/00). Amortiguadores de la Cúpula GTC. Hebico Ingenieros, S.A. (Ref. SV-GMU-T-00/023)
- DP31 Plano DR/DM-SH-MV-001 (hoja 1, 2 y 3). Accionamiento de las compuertas
- DP32 Plano DR/DM-SH-MV-003 (hoja 1, 2, 3, 4 y 5). Accionamiento compuerta grande y pequeña. Motorreductores
- DP33 Plano DR/DM-SH-MV-004 (Edición 1C). Accionamientos compuertas (grande, pequeña). Apoyos para las cadenas
- DP34 Documento Ref. SV-GMU-T-01/0002, Informe Técnico del Departamento Técnico de Bettor MBT, S.A. (Informe N° P14/01)
- DP35 Documento Ref. MN-GMU-T-01/32, Informe Técnico del Departamento Técnico de Bettor MBT, S.A. (Informe N° P28/01)
- DP36 Mail Ref 249001-UR-GMU-E-01/0095, GTC Pernos de anclaje
- DP37 Comprobación de los pernos de anclaje de la Cúpula Ref. GMU-1-CL-IE-005, Ed. 1

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 15 de 145
---	--	---

3. GEOMETRÍA Y M.E.F. DE LA CÚPULA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA

La estructura de la cúpula tiene forma semiesférica prealtada con un radio exterior de 17528 mm, un radio interior (cámara del telescopio) 16723 mm, dejando una cámara de 705 mm de espesor para ventilación natural entre la pared interior y exterior. El plano GMU-1-D-IE-001 muestra la disposición general de la Cúpula.

La estructura principal de la cúpula consta de las siguientes partes:

- Anillo base (Plano: DP5)
- Vigas de arco (Plano: DP12 a DP17)
- Meridianos principales (Plano: DP7 y DP9)
- Paralelos principales (Plano: DP8 y DP9)
- Meridianos y paralelos secundarios (Plano: DP20)
- Compuertas de observación (Plano: DP24)
- Vigas de cierre (Planos: DP10 y DP18)
- Chapa de cerramiento exterior (Plano: DP19 y DP20)
- Viga carril y carril de rodadura (Plano: DP4)
- Faldones de cierre (Plano: DP23)
- Ventanas de ventilación (Plano: DP29)
- Plataformas (Plano: DP25)
- Aislamiento interior
- Pantalla antiviento (Planos: DP26)

La cúpula tiene 16 ventanas para ventilación interior, con una superficie total de 228,204 m². Cada una de estas ventanas tiene un cierre de una sola lama, que cuando abre se desliza paralelamente a la pared exterior de la cúpula sobre un carril en la parte superior de la lama.

El cierre de la abertura de observación se realiza con dos compuertas de 90° y 27° cada una. Estas compuertas se abren y cierran desplazándose sobre las vigas de arco, a través de unos carretes con ruedas.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 16 de 145
---	--	---

El movimiento de las compuertas se hace a través de un mecanismo de abertura y cierre con cadenas.

La estructura de la cúpula, a través del anillo base, se soporta en 20 carretones de rodadura que permiten el giro de la misma en sentido dextrógiro o levogiro. Estos carretones van atornillados a la cara inferior del anillo base y ruedan sobre un rail de rodadura que está anclado a una viga cajón anular anclada a la base de hormigón del Edificio del Telescopio.

Hay un carretón de rodadura debajo de cada uno de los meridianos principales y otro en cada uno de los extremos de las vigas de arco. En total hay 15 carretones de 2 ruedas y 5 carretones de 4 ruedas.

En la parte inferior de la abertura de observación de la cúpula, se almacena una pantalla antiviento, formada por paneles plegados unidos entre sí, que se despliegan por unas guías situadas en los laterales de las vigas de arco. El movimiento de la pantalla se realiza al ser arrastrada ésta por la compuerta de observación inferior, en la cual se encuentra el mecanismo de arrastre de dicha pantalla.

3.2 M.E.F. DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA

3.2.1 Partes estructurales de la cúpula

Para realizar los análisis estructurales del conjunto de la cúpula, se han realizado dos modelos globales de elementos finitos, uno con compuertas de observación y ventanas cerradas, y otro con compuertas de observación y ventanas abiertas.

Los modelos y cálculos con elementos finitos se han realizado con el programa ANSYS 5.5. En los modelos de elementos finitos se han representado las siguientes partes estructurales:

- Anillo base
- Vigas de arco
- Meridianos principales
- Paralelos principales
- Meridianos y paralelos secundarios
- Vigas de cierres de la abertura de observación
- Chapa de cerramiento exterior
- Aislamiento interior
- Ventanas de ventilación

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 17 de 145
---	--	---

- Compuertas de observación
- Carretones de rodadura

Los estudios de la pantalla antiviento, carril de rodadura, y la viga soporte del carril de rodadura antivuelco de las compuertas de observación se analizan en el apartado 6 de este documento por medio de modelos locales de elementos finitos.

En las figuras 3.1 a 3.10 del Anexo A, se hace una descripción del M.E.F. desarrollado.

3.2.2 Descripción del M.E.F. global de la cúpula

La modelización realizada, para cada una de las partes estructurales de la cúpula ha sido:

- **Anillo base**

El anillo base está formado por una viga cajón de sección trapezoidal de 762 mm de ancho por 681 mm de alto (ver DP 5). La viga se compone de:

- 2 placas laterales de 10 mm, inclinadas siguiendo la dirección de la pared de la cúpula (REAL 4).
- Una placa superior y otra inferior de 20 mm de espesor. Estas dos placas van agujereadas con taladros de $\varnothing$ 350 mm, distanciados entre si cada 700 mm (REAL 2).
- En el interior de la viga cajón se disponen cartelas transversales de 20 mm. Se dispone en una cartela transversal en cada uno de los puntos de unión con los 20 carretones (REAL 5).
- La viga se transporta en módulos que se unen entre sí mediante uniones atornilladas.

El conjunto de la viga del anillo base se ha modelizado mediante elementos placa de 4 nodos, incluidos las cartelas interiores de 20 mm. No se han modelizado los diferentes agujeros de la placa superior e inferior por lo que en el proceso de chequeo de tensiones de la viga, habrá que multiplicar los estados de tensiones obtenidos por unos factores de intensificación de tensiones introducidos por dichos agujeros.

- **Vigas de arco**

Cada una de las vigas de arco están formadas por un cajón de sección rectangular de 400 mm de ancho por 1.500 mm de alto (ver DP 11). La viga se compone de:

- 2 placas laterales de 10 mm de espesor (REAL 10).

En una de las placas laterales se disponen agujeros para instalar 8 ventanas para ventilación natural de la pared de la estructura de la cúpula. Por cada ventana de ventilación natural hay que dejar un agujero para el marco de la ventana de $\cong$ 1200 x

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 18 de 145
---	--	---

500 mm², y otro agujero colocado en la parte inferior del anterior para el paso del aire desde la cámara interior de la pared al interior de la viga cajón.

- Una placa superior de 20 mm de espesor (REAL 11).

Sobre esta placa va colocado el carril de rodadura de abertura y cierre de las compuertas de observación. Éste va colocado sobre una viga cajón auxiliar que va su vez soldada sobre la placa superior de 20 mm.

- Una placa inferior de 20 mm de espesor (REAL 12).
- Cartelas interiores de 15 mm de espesor. Estas cartelas a su vez van agujereadas para mejorar la ventilación en el interior de la viga de arco y evitar la formación de cámaras estancas (REAL 13).
- La viga de arco se transporta en 6 módulos que se unen entre sí mediante uniones atornilladas.

La viga de arco se ha modelizado con elementos placa de 4 nodos (caras laterales, placa superior, placa inferior y cartelas de rigidización interior).

Se han modelizado los agujeros dispuestos en una de las placas laterales para permitir la ventilación natural de la pared de la cúpula, para estudiar el efecto local de estos huecos.

No se han modelizado los agujeros de las cartelas interiores de las vigas de arco, por lo que en el proceso de chequeo de tensiones habrá que multiplicar los estados de tensiones de las cartelas por los factores de intensificación de tensiones introducidos por dichos agujeros.

La viga soporte del carril antivuelco de las compuertas de observación se ha modelizado con elementos barra de dos nodos con características de área e inercia equivalentes. En el Apartado 6.2 de este documento se hace un análisis detallado de los estados de tensiones locales en esta viga.

- **Meridianos principales**

Los meridianos principales de la cúpula, son celosías que unen la viga del anillo base con las vigas de arco o vigas de cierre siguiendo la forma de meridiano de la cúpula (ver DP 7).

Se disponen meridianos principales cada 15° y 16.5° de forma alternativa, siendo los meridianos principales colocados a 15° los que sirven a su vez como marco de las ventanas de ventilación de la cúpula.

La celosía de los meridianos está formada por:

- Cordones definidos por perfiles UPN 200 (REAL 20 Y 21).
- Diagonales definidos por perfil cuadrado 100 x 5 (REAL 22).

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 19 de 145
---	--	---

- Las celosías se transportan en varias piezas que se unen entre sí mediante tornillos.
- Los módulos de chapa esférica de cierre se atornillan a los laterales del perfil UPN 200 que define el cordón exterior de la celosía, mediante pletinas de 7 mm de espesor.

La modelización de las diferentes partes de la celosía de los meridianos principales (cordones, diagonales), se ha realizado con elementos barra de 2 nodos de características de área e inercia equivalentes. En la modelización del cordón exterior de la celosía se han empleado elementos de área e inercia equivalentes al perfil UPN 200 mas las pletinas laterales de atornillado de los módulos que definen el cierre esférico.

• **Paralelos principales**

Los paralelos principales de la cúpula, son celosías dispuestas a modo de paralelos de la esfera que van atornillados a los meridianos principales (ver DP 8).

Se disponen cuatro paralelos principales, de forma que a su vez éstos sirvan de marco superior e inferior de las ventanas de ventilación.

Los paralelos principales unen los meridianos principales, por lo tanto, dichos paralelos serán de dimensiones definidas por los 15° y 16.5° de separación entre meridianos.

Las celosías de los paralelos principales están formadas por:

- Cordones definidos por perfiles ½ IPE270 (REAL 23 Y 24).
- Diagonales y montantes definidos por perfiles cuadrado 80 x 5 (REAL 25).
- Los módulos de chapa esférica de cierre se atornillan a los laterales del alma del perfil ½ IPE 270 que forma el cordón exterior de la celosía mediante pletinas de 7 mm de espesor.

Para la modelización de las diferentes partes de las celosías de los paralelos principales (cordones, diagonales, montantes) se ha empleado elementos barra de 2 nodos de características de área e inercia equivalentes. En la modelización del cordón exterior de la celosía se han modelizado elementos de área e inercia equivalentes al perfil ½ IPE 270 más las pletinas laterales de atornillado de los módulos que definen el cierre esférico.

• **Meridianos secundarios**

Los meridianos secundarios se localizan entre los meridianos principales de la estructura, así entre dos meridianos principales separados 15°, se localiza un meridiano secundario y entre dos meridianos principales separados 16.5°, se localizan dos meridianos secundarios (ver DP 19 y DP 20).

Los meridianos secundarios están formados por:

- Cordón exterior formado por un perfil L 70 x 70 x 7, soldado directamente a la chapa de cierre esférica (REAL 30).

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 20 de 145
---	--	---

- Cordón interior formado por un perfil cuadrado 70 x 4, que servirá de apoyo del soporte del aislamiento interior (REAL 31).
- Perfiles de unión entre el cordón exterior e interior, formados por perfiles L 70 x 70 x 7, dispuestos en la dirección radial de la esfera (REAL 32).
- El cordón interior y perfiles de unión van soldados entre sí y la unión de los perfiles de unión con el cordón exterior se hace con una unión atornillada.
- El cordón interior va atornillado con sus extremos a los paralelos principales.
- En el punto de unión del cordón interior con los paralelos principales se dispone un perfil cuadrado 70 x 4 en forma diagonal que servirá de arriostramiento de los paralelos principales en dirección transversal.

La modelización de las diferentes partes de los meridianos secundarios (cordón superior, cordón inferior, perfiles de unión y perfiles en diagonal de arriostramiento) se modelizan con elementos barra de 2 nodos de características de área e inercia equivalentes.

- **Paralelos secundarios**

Además de los cuatro paralelos principales, se disponen en la estructura de la cúpula de un conjunto de paralelos secundarios formados por perfil L 70 x 70 x 7, soldado directamente al interior de la chapa de cerramiento exterior (REAL 30) (ver DP 19 y DP 20).

La modelización de estos perfiles que forman los paralelos secundarios se hace mediante elementos barra de 2 nodos de características de área e inercia equivalentes.

Dos de estos paralelos secundarios llevan además una correa en su parte inferior formada por perfiles cuadrado 70 x 4 que sirven de unión entre los diferentes meridianos principales y secundarios.

- **Chapa de cerramiento exterior**

El cierre de la estructura de la cúpula se realiza mediante chapa de 5 mm conformada en forma poligonal de radio exterior de 17528 mm (REAL 1) (ver DP 19 y DP 20).

Se montan en taller módulos de chapa de cierre de grandes dimensiones $\cong 4 \times 4 \text{ m}^2$. Dichos módulos están formados por chapa esférica de 5 mm que llevan soldados en la cara interna los cordones superiores de los meridianos secundarios definidos por perfiles en L 70 x 70 x 7, y los paralelos secundarios formados por perfiles L 70 x 70 x 7. En el perímetro de dichos módulos se suelda una pletina de 7 mm de espesor que sirve para atornillar los módulos de cierre a los meridianos y paralelos principales.

La modelización del cierre exterior se ha realizado con elementos placa de 4 nodos, y 5 mm de espesor.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 21 de 145
---	--	---

• Aislamiento interior

La cámara interior de la cúpula del telescopio está aislada térmicamente del exterior, mediante una pared de aislamiento térmico de unos 80 mm de espesor. Dicho aislamiento térmico incluye:

- Una lámina metálica de cierre exterior del aislamiento de $\cong 0.6$ mm.
- Una lámina metálica de cierre interior del aislamiento de $\cong 0.8$ mm.
- Material aislante colocado entre las dos láminas de cierre.
- Perfiles rectangulares soldados a modo de paralelos a los cordones interiores de los meridianos principales y meridianos secundarios. Estos perfiles servirán de soportado de las láminas metálicas de cierre y material de aislamiento.

El conjunto de pared de aislamiento térmico tiene un peso de $\cong 17$ kg/m².

En los modelos de elementos finitos, no se ha considerado la contribución de rigidez que aporta la pared de aislamiento, si bien los perfiles rectangulares contribuirán a evitar el posible pandeo transversal de los cordones interiores de los meridianos secundarios formados por cuadrado 70 x 4.

El peso del aislamiento de $\cong 17$ kg/m², se ha simulado en los modelos de elementos finitos, incrementando la densidad de la chapa esférica del cierre de 5 mm, de modo que el peso de esta placa sea equivalente a la de la propia placa más aislamiento térmico.

• Ventana de ventilación

La cúpula tiene 16 ventanas con una superficie total para ventilación interior de la cámara del Telescopio de $\cong 228,204$ m². Cada una de estas ventanas tienen un cierre de una sola lama, que cuando abre se desliza paralelamente a la pared de la cúpula sobre un carril en la parte superior de la lama. En la parte inferior de la lama hay un rail que evita el movimiento de la misma en dirección perpendicular a la de la pared de la cúpula (ver DP 21).

Cada una de las lamas de las ventanas está compuesta por:

- 2 placas de 3 mm de espesor separados entre si 120 mm, dejando un hueco en su interior.
- En el perímetro de la lama se dispone un perfil UPN 120 en cuyos laterales se sueldan las placas de 3 mm.
- En el interior de la lama se introduce una rigidización de dos perfiles IPN 120 verticales y un perfil IPN 120 localizado en el centro de la lama en posición horizontal. Dichos perfiles van soldados a las placas de 3 mm.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 22 de 145
---	--	---

- Además de esta rigidización las caras interiores de las chapas de 3 mm se rigidizan con pequeños perfiles cuadrados de 40 x 3 soldados a la chapa en posición vertical y separados entre si $\cong 400$ mm.
- En el interior del hueco de 120 mm que queda entre las dos chapas de 3 mm, se rellena con aislamiento térmico de lana de roca.

El peso de conjunto de la estructura de la lama más aislamiento térmico es de ≈ 100 kg/m².

La modelización de las lamas de las ventanas de ventilación se ha realizado con elementos lámina de 4 nodos. Para cada lama se han superpuesto dos tipos de elementos lámina

- a) Elementos lámina trabajando solamente como elemento membrana, de área equivalente a la que presenta la estructura de la lama (REAL 80).
- b) Elementos lámina trabajando solamente como elementos de flexión, con un espesor equivalente que simula la inercia a flexión de la estructura de la lama (REAL 81).

El peso del conjunto de la estructura de la lama se ha simulado con una densidad equivalente en los elementos de membrana, poniendo un valor nulo en los elementos de flexión.

La unión de los elementos que representan la estructura de la lama con el resto de la estructura de la cúpula, se ha realizado de la forma siguiente:

- Se igualan los tres desplazamientos de los nodos de la línea superior de la lama con los desplazamientos de los nodos confrontados en la estructura de la cúpula.
- Se igualan los desplazamientos en la dirección radial de la esfera, entre los nodos de la línea inferior de la lama y los nodos confrontados en la estructura de la cúpula.

• **Compuertas de observación**

El cierre de la abertura de observación se realiza con dos compuertas de 27° y 90° cada una. Estas compuertas se abren y cierran moviéndose sobre las vigas de arco, a través de 36 carretes con ruedas (ver DP 24).

Cada una de las compuertas se subdividen en módulos para poder transportarlas. Así la compuerta de 90° se compone de 12 módulos de 7.5° y la compuerta de 27° se compone de 4 módulos de 6.75° cada uno con una longitud aproximada de estos módulos de 12.5 m. La unión de los módulos para formar cada una de las compuertas se hace con uniones atornilladas.

Cada uno de los módulos se compone de:

- Dos celosías laterales (a lo largo de los 12.5 m de longitud del módulo) formados por cordones superior e inferior de perfil L 80 x 80 x 8 (REAL 49 y 50) y diagonales y montantes de perfil cuadrado 50 x 4 (REAL 51 y 52). La unión entre módulos se hace

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 23 de 145
---	--	---

atornillando entre si los cordones superior e inferior (L 80 x 80 x 8) de las respectivas celosías.

- Seis celosías longitudinales soldadas a las celosías laterales. Están formadas por cordones superior e inferior de perfil cuadrado 70 x 4 (REAL 53) y un montante y dos diagonales en cada celosía formadas por cuadrado 50 x 4 (REAL 51 y 54).
- Chapa de cierre de 5 mm en la cara superior del módulo, soldada a los cordones superiores de las celosías laterales y los cordones superiores de las celosías longitudinales (REAL 55).
- Chapas de cierre lateral de las compuertas (REAL 57) definidas por placas de 10 mm de espesor, y con agujeros de Ø 100 mm para ventilación en el interior de las compuertas de observación. Sobre estas chapas de cierre lateral es donde se atornillan los carretes de rodadura de las compuertas de observación.
- Los módulos colocados en los extremos de las compuertas, llevan una chapa de cierre frontal de compuerta de 10 mm (REAL 56), soldada junto a la cercha lateral del módulo. Las chapas de cierre frontal de unión entre las compuertas de 90° y 27°, van agujereados para permitir una mejor ventilación en el interior de las compuertas.
- En la parte inferior del módulo, se instala un aislamiento térmico similar al del aislamiento de la pared de la cúpula. Los perfiles de soportado del aislamiento se sueldan a los cordones inferiores de las celosías laterales de los módulos.

La modelización de la chapa de cierre de 5 mm, chapa de cierre lateral de 15 mm y chapas de cierre frontal de 10 mm de las compuertas se han realizado con elementos placa de 4 nodos.

En la chapa de cierre de 5 mm se ha considerado una densidad de material equivalente de forma que el peso de las placas sea el de las propias placas mas el aislamiento térmico de las compuertas.

Los perfiles de las celosías laterales y longitudinales de los módulos (cordones, diagonales y montantes), se han modelizado con elementos barra de 2 nodos de características de área e inercia equivalentes.

La modelización de la unión entre las compuertas de observación y las vigas de arco se ha realizado mediante muelles de alta rigidez (localizados en los puntos de situación de los carretes de rodadura) en las siguientes direcciones según el sistema cilíndrico que definen las vigas de arco:

- Dirección radial: representa las ruedas principales de los carretes sobre la viga de arco y carretes antivuelco.
- Dirección lateral: representa el desplazamiento impedido por los rodillos laterales de los carretes sobre la viga de arco.

- Dirección circunferencial: representa el movimiento impedido por las cadenas de actuación. Se colocan estos muelles solamente en el primer módulo de cada compuerta que es donde enganchan las cadenas.

3.3 MATERIALES

El conjunto de estructura se conforma con perfiles y chapa de acero al carbono S275-JR, de acuerdo a la norma UNE-EN-10025, con las características siguientes:

$$E = 2.1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Módulo de elasticidad)}$$

$$\nu = 0.33 \text{ (Coeficiente de Poisson)}$$

$$\sigma_y = 2750 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Límite elástico)}$$

$$\sigma_R = 4300 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Límite de rotura)}$$

$$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ (Coeficiente de expansión térmica)}$$

$$\varphi = 7,800 \text{ kg/m}^3 \text{ (Densidad)}$$

$$K = 43 \text{ w/m } ^\circ\text{C} \text{ (Conductividad térmica)}$$

$$C_p = 480 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \text{ (Capacidad térmica)}$$

3.4 PESOS DE LA ESTRUCTURA DE LA CÚPULA

Los pesos de las partes estructurales de la cúpula del telescopio son:

Pesos de la cúpula

- Anillo base	35 Tn
- Vigas de arco	61 Tn
- Meridianos principales	40 Tn
- Paralelos principales.....	24 Tn
- Meridianos y paralelos secundarios	17 Tn
- Chapa esférica de cierre	70 Tn
- Aislamiento térmico	30 Tn
- Ventanas de ventilación	24 Tn
- Pantallas antiviento	4 Tn

- Otros (plataformas, grúas, bogies, carretones...) 43 Tn

TOTAL $\cong$ 348 Tn

Pesos de la compuerta de 90°

- Celosías 15 Tn

- Chapa de cierre 17 Tn

- Aislamiento térmico 9 Tn

TOTAL $\cong$ 41 Tn

Pesos de la compuerta de 27°

- Celosías 6 Tn

- Chapa de cierre 7 Tn

- Aislamiento térmico 3 Tn

TOTAL $\cong$ 16 Tn

Resumen de pesos de la estructura

Aproximadamente, el peso total de la estructura de la cúpula es de 405 Tn. Considerando que otros elementos estructurales pueden suponer del orden del 10% (40 Tn) el peso total de la estructura será aproximadamente de 445 Tn.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 26 de 145
---	--	---

4. ANÁLISIS ESTÁTICOS

4.1 COMBINACIONES DE CARGA

4.1.1 Cargas consideradas

Las cargas consideradas en el análisis realizado del modelo de la cúpula del Telescopio son las siguientes:

Peso propio (PP)

Incluye el peso de la estructura, aislamiento, mecanismos, etc.

El peso propio se considera tanto en el modelo con compuerta abierta como en el de compuerta cerrada.

Sobrecarga (SC)

Grúas boom y zenit. Se ha analizado independientemente el efecto de estas grúas y se ha llegado a la conclusión de que únicamente producen efectos locales. Por esta razón no se incluyen estas cargas en las combinaciones de carga.

Nieve

Se considera la posible existencia de una capa de nieve de 2.25 m de espesor. De acuerdo con la normativa NBE-AE/88 se considera una densidad de 120 Kg/m³.

Esta carga se aplica tanto al modelo con compuerta abierta como al de compuerta cerrada teniendo en cuenta la variación de inclinación la superficie de la cúpula.

Viento en dirección +X

La distribución de presiones originada por el viento se realiza de acuerdo con las indicaciones postuladas en NBE-AE/88 para esferas de superficie lisa, considerándose coeficientes eólicos entre +0,8 y -2,0.

- Modelo con compuerta abierta. Se considera una velocidad máxima del viento de 27 m/s (≈ 100 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 45.6 Kg/m².
- Modelo con compuerta cerrada. Se considera una velocidad máxima del viento en condiciones extremas de 67 m/s (≈ 240 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 280.6 Kg/m².

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 27 de 145
---	--	---

Para el modelo con compuerta cerrada se considera también un viento en dirección X en condiciones de operación con velocidad igual a 27 m/s (≈ 100 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 45.6 Kg/m².

Viento en dirección $\pm Y$

Se realizan las mismas consideraciones que para el viento en dirección X.

- Modelo con compuerta abierta. Se considera una velocidad máxima del viento de 27 m/s (≈ 100 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 45.6 Kg/m².
- Modelo con compuerta cerrada. Se considera una velocidad máxima del viento en condiciones extremas de 67 m/s (≈ 210 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 280,6 Kg/m².

Para el modelo con compuerta cerrada se considera también viento en dirección $\pm Y$ en condiciones de operación con velocidad igual a 27 m/s (≈ 100 Km/h). Esto equivale a una presión dinámica de 45,6 Kg/m².

Sismo

En la norma NCSE-94, artículo 1.2.3, se indica que no es de obligatoria la aplicación de esa normativa en el caso de que se trate de una construcción de moderada importancia o en las demás construcciones cuando la aceleración sísmica de cálculo a_c sea inferior a 0.06 g. Seguidamente se calcula el valor máximo de aceleración a considerar y se compara el valor de 0.06 g.

En el artículo 2.2 de NCSE-94 se define: $a_c = c \cdot a_b$

donde:

c: coeficiente de riesgo en función del período de vida (en años) para el que se proyecta la construcción.

$$c = (t/50)^{0,37} = (50/50)^{0,37} = 1$$

a_b : aceleración sísmica básica definida en el artículo 2.1 de NCSE-94. Según este artículo, para la zona del emplazamiento se tiene:

$$a_b = K \cdot a = 1,0 \cdot 0,04g = 0,04g$$

Por tanto, la aceleración de cálculo que hemos de considerar es de 0,04g por lo que no es obligatoria la aplicación de la norma NCSE-94.

Conservadoramente se ha considerado para el análisis realizado una aceleración actuando simultáneamente en las tres direcciones (X, Y, Z) de valor 0,06g.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 28 de 145
---	--	---

Las cargas de accionamiento de las compuertas o las de frenado de compuertas y cúpula se considerarán en análisis locales que se realizan en R1.

4.1.2 Combinaciones de cargas

Las combinaciones de carga que se consideran en el modelo son las siguientes:

Modelo con compuerta y ventanas abiertas:

- (1) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ X)$
- (2) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ Y)$
- (3) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ -Y)$
- (4) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (5) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ X) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (6) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ Y) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (7) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ -Y) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (8) $1.00 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (SISMO\ X,Y,Z)$

En las combinaciones anteriores el viento que se considera es el correspondiente a operación (27 m/s).

Modelo con compuerta y ventanas cerradas:

- (11) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ X)$
- (12) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ Y)$
- (13) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ -Y)$
- (14) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (15) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ X) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (16) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ Y) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (17) $1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO\ -Y) + 1.5 \cdot (NIEVE)$
- (18) $1.00 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SISMO\ X,Y,Z)$

En las combinaciones anteriores el viento que se considera es el correspondiente a condiciones extremas (67 m/s).

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 29 de 145
---	--	---

$$(19) \quad 1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO \text{ X OPERACIÓN})$$

$$(20) \quad 1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO \text{ Y OPERACIÓN})$$

$$(21) \quad 1.33 \cdot (PP) + 1.5 \cdot (SC) + 1.5 \cdot (VIENTO \text{ -Y OPERACIÓN})$$

En las combinaciones anteriores el viento que se considera es el correspondiente a operación (27 m/s).

4.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Para los diferentes casos de carga estáticos analizados se han considerado las condiciones de contorno en los carretes de la base de la cúpula siguientes:

a) Carretes de la base de la cúpula

- Peso propio, Nieve: Impedidos solamente los desplazamientos verticales. Desplazamientos radiales y circunferenciales se dejan libres.

En los rodillos radiales de los carretes se dejan las holguras necesarias para permitir considerar liberados los desplazamientos radiales.

- Viento: Impedidos solamente los desplazamientos vertical y radial. El desplazamiento tangencial se impide solamente en el carretón opuesto a la dirección del viento.

b) Compuerta de observación

Para los diferentes casos de carga estática analizada se han considerado las condiciones de contorno en los carretes de las compuertas de observación siguientes:

- Peso propio, Nieve: Impedidos los desplazamientos radiales en todos los puntos que simulan las ruedas de los carretes e impedidos los desplazamientos circunferenciales en los puntos de enganche de las cadenas.

Los desplazamientos laterales se dejan libres y se analizan las holguras necesarias en los rodillos laterales de los carretes para que se permita las deformaciones laterales producidas por estos casos de carga.

- Viento: Impedidos los desplazamientos radiales y laterales en todos los puntos que simulan las ruedas de los carretes de las compuertas de observación. Impedidos los desplazamientos circunferenciales en los puntos de enganche de las cadenas en las compuertas de observación.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 30 de 145
---	--	---

4.3 ESTADOS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

A continuación se proporciona una serie de tablas con los resultados de tensiones obtenidos para cada uno de los componentes de la estructura. Para cada elemento estructural se da la siguiente información:

- Número de referencia de la constante real que sirve para identificar cada elemento estructural.
- Número de referencia de del tipo de elemento empleado de la biblioteca de elementos del programa ANSYS.
- Características del elemento estructural (espesor, tipo de perfil laminado, ...).
- Breve descripción del elemento estructural a que se refiere.
- HIPÓTESIS: número de referencia de la combinación de carga a la que se refieren los resultados de tensiones.
- σ_{co} (máxima): máxima tensión soportada por cada elemento estructural para cada una de las combinaciones de carga consideradas (en Kg/cm²).
- OBSERVACIONES: comentarios a los resultados obtenidos. Cuando en esta columna aparece un número entre paréntesis, dicho número indica la máxima tensión de comparación aplicable a la combinación de cargas correspondiente una vez eliminados los efectos locales más significativos.

La interpretación de los resultados en tensiones es la siguiente:

Para el cálculo de tensiones que aparecen en las tablas que se proporcionan a continuación, se emplea la siguiente expresión:

$$\sigma_{co} = \sqrt{\left(\left|\frac{N}{A}\right| + \left|\frac{Mx}{Wx}\right| + \left|\frac{My}{Wy}\right|\right)^2 + 3\left(\left[\frac{Qx}{Acx}\right]^2 + \left[\frac{Qy}{Acy}\right]^2 + \left[\frac{Mt}{Wt}\right]^2\right)}$$

Los cálculos se realizan en valor absoluto y por tanto los resultados obtenidos se encuentran del lado de la seguridad. Para cada elemento estructural tipo viga se comprueba el nivel de tensiones teniendo en cuenta el efecto del pandeo. Los resultados así obtenidos se comparan con la tensión máxima admisible del acero (2750 kg/cm²). Se comprueba si se cumple la normativa AE/95.

Para cada uno de los elementos estructurales tipo viga, tan solo se estudiará si existen o no efectos locales en aquellos casos en los que en las tablas de resultados en tensiones proporcionadas por ANSYS se obtengan valores de tensiones de comparación superiores a 2750 kg/cm² dividido por el coeficiente de pandeo correspondiente.

4.3.1 Tensiones en la chapa de cerramiento de la cúpula

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 1

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 1 (SHELL63)

Descripción: chapa de cierre de la cúpula de 5 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	239
2	236
3	181
4	496
5	487
6	357
7	314
8	256
11	1000
12	547
13	675
14	442
15	1000
16	470
17	395
18	347
19	225
20	176
21	164

TABLA 4.1
TENSIONES EN LA CHAPA DE CERRAMIENTO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 496 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1000 Kg/cm².

4.3.2 Tensiones en las placas superior e inferior del anillo base

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 2

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 2 (SHELL63)

Descripción: placas superior e inferior del anillo inferior de 20 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	228
2	187
3	217
4	421
5	301
6	240
7	292
8	182
11	403
12	445
13	425
14	348
15	321
16	517
17	547
18	188
19	149
20	177
21	207

TABLA 4.2
TENSIONES EN PLACAS SUPERIOR E INFERIOR DEL ANILLO BASE

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 421 Kg/cm². Si se consideran los taladros efectuados de Ø 350 la tensión máxima es de 794 kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 547 Kg/cm². Considerando la presencia de los taladros, la tensión máxima en condiciones extremas es de 1032 Kg/cm².

4.3.3 Tensiones en las chapas laterales del anillo base

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 4

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 2 (SHELL63)

Descripción: placas laterales del anillo inferior de 10 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	231
2	229
3	254
4	326
5	305
6	315
7	345
8	230
11	473
12	525
13	565
14	404
15	428
16	606
17	636
18	252
19	171
20	210
21	271

TABLA 4.3
TENSIONES EN LAS CHAPAS LATERALES DEL ANILLO BASE

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 345 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 636 Kg/cm².

4.3.4 Tensiones en las cartelas del anillo base

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 5

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 2 (SHELL63)

Descripción: cartelas del anillo inferior de 20 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	237
2	219
3	221
4	374
5	312
6	307
7	315
8	198
11	272
12	335
13	218
14	385
15	341
16	441
17	275
18	193
19	157
20	199
21	178

TABLA 4.4
TENSIONES EN LAS CARTELAS DEL ANILLO BASE

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 374 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 441 Kg/cm².

4.3.5 Tensiones en las placas laterales de la viga arco

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 10

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 3 (SHELL63)

Descripción: placas laterales de las vigas arco de 10 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	195
2	116
3	178
4	298
5	246
6	206
7	228
8	138
11	523
12	633
13	547
14	417
15	539
16	516
17	353
18	179
19	157
20	181
21	124

TABLA 4.5
TENSIONES EN LAS PLACAS LATERALES DE LA VIGA ARCO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 298 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 633 Kg/cm².

No se precisa de ningún coeficiente corrector para considerar el efecto de los huecos puesto que éstos han sido modelizados.

4.3.6 Tensiones en la placa superior de la viga arco

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 11

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 3 (SHELL63)

Descripción: placa superior de las vigas arco de 20 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	336
2	298
3	278
4	740
5	548
6	634
7	617
8	306
11	1110
12	460
13	432
14	375
15	927
16	303
17	615
18	150
19	98
20	137
21	208

TABLA 4.6
TENSIONES EN LA PLACA SUPERIOR DE LA VIGA ARCO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 740 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1110 Kg/cm².

4.3.7 Tensiones en la placa inferior de la viga arco

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 12

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 3 (SHELL63)

Descripción: placa inferior de las vigas arco de 20 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	190
2	120
3	170
4	291
5	243
6	176
7	220
8	140
11	464
12	1110
13	830
14	516
15	583
16	785
17	502
18	181
19	157
20	184
21	126

TABLA 4.7
TENSIONES EN LA PLACA INFERIOR DE LA VIGA ARCO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 291 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1110 Kg/cm².

4.3.8 Tensiones en las cartelas interiores de la viga arco

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 13

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 3 (SHELL63)

Descripción: cartelas interiores de las vigas arco de 15 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	339
2	190
3	127
4	600
5	598
6	450
7	365
8	262
11	678
12	1460
13	901
14	631
15	827
16	1260
17	513
18	193
19	183
20	176
21	100

TABLA 4.8
TENSIONES EN LAS CARTELAS INTERIORES DE LA VIGA ARCO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 600 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1460 Kg/cm². Teniendo en cuenta la presencia de huecos y del rigidizador la máxima tensión que resulta en condiciones de servicio es de 850 kg/cm² y de 2072 kg/cm² en condiciones extremas.

4.3.9 Tensiones en los cordones de los meridianos principales con pletinas (exteriores)

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 20

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 4 (BEAM44)

Descripción: Cordón exterior de los meridianos principales.

Perfil: UPN-200 con pletinas de 7 mm de espesor en las alas.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	347
2	353
3	411
4	930
5	544
6	509
7	595
8	359
11	534
12	943
13	1160
14	1230
15	818
16	1250
17	851
18	368
19	316
20	387
21	327

TABLA 4.9
TENSIONES EN LOS CORDONES DE LOS MERIDIANOS PRINCIPALES (EXTERIORES)

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 930 Kg/cm². Considerando los coeficientes de pandeo, la tensión de servicios es 1096 kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1250 Kg/cm². Considerando los coeficientes de pandeo la tensión máxima en condiciones extremas es 1473 kg/cm².

4.3.10 Tensiones en los cordones de los meridianos principales sin pletinas (interior)

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 21

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 4 (BEAM44)

Descripción: Cordón interior de los meridianos principales.

Perfil: UPN-200.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)	Observaciones
1	466	
2	416	
3	444	
4	893	
5	724	
6	646	
7	701	
8	435	
11	1230	
12	3860	Efecto local (unión viga arco) (1230)
13	1900	Efecto local (unión viga arco) (985)
14	1180	
15	874	
16	3350	Efecto local (zona unión viga arco) (1120)
17	1150	
18	467	
19	449	
20	436	
21	366	

TABLA 4.10
TENSIONES EN LOS CORDONES DE LOS MERIDIANOS PRINCIPALES (INFERIORES)

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 893 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1052 kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 3860 Kg/cm². En las combinaciones 12, 13 y 16 existen efectos locales en la unión con la viga arco debidos al mallado del modelo. Sin ese efecto el valor de la máxima tensión que puede considerarse para estos elementos es de 1230 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1449 Kg/cm².

4.3.11 Tensiones en las diagonales de los meridianos principales

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 22

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 4 (BEAM44)

Descripción: Diagonales de los meridianos principales.

Perfil: CUADRADO 100·5

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	238
2	207
3	219
4	556
5	356
6	308
7	336
8	197
11	461
12	1370
13	695
14	684
15	561
16	1180
17	426
18	225
19	226
20	233
21	180

TABLA 4.11
TENSIONES EN LAS DIAGONALES DE LOS MERIDIANOS PRINCIPALES

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 556 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 634 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1370 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1562 Kg/cm².

4.3.12 Tensiones en los cordones con pletinas de los paralelos principales (exterior)

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 23

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 5 (BEAM44)

Descripción: Cordón exterior de los paralelos principales.

Perfil: ½ IPE-270 con pletina de 7 mm espesor

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	378
2	372
3	328
4	567
5	538
6	520
7	501
8	329
11	770
12	727
13	493
14	665
15	1020
16	1000
17	438
18	342
19	304
20	315
21	275

TABLA 4.12
TENSIONES EN LOS CORDONES DE LOS PARALELOS PRINCIPALES (EXTERIORES)

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 567 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 591 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1020 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1062 Kg/cm².

4.3.13 Tensiones en los cordones sin pletinas de los paralelos principales (interior)

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 24

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 5 (BEAM44)

Descripción: cordones interiores de los paralelos principales.

Perfil: ½ IPE-270

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)	Observaciones
1	685	
2	295	
3	515	
4	762	
5	839	
6	491	
7	680	
8	310	
11	2210	Efecto local (unión viga arco) (1280)
12	2650	Efecto local (unión viga arco) (1120)
13	1040	
14	1310	
15	2830	Efecto local (unión viga arco) (1710)
16	2960	Efecto local (zona unión viga arco) (1370)
17	986	
18	636	
19	734	
20	697	
21	395	

TABLA 4.13
TENSIONES EN LOS CORDONES DE LOS PARALELOS PRINCIPALES (INFERIORES)

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 839 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 874 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 2960 Kg/cm². En las combinaciones 11, 12, 15 y 16 existen efectos locales en la zona de unión con la viga arco debidos al mallado del modelo de elementos finitos. Se trata sin embargo de efectos locales del modelo que, a efectos globales no deben ser tenidos en cuenta. Sin ese efecto el valor de la máxima tensión que puede considerarse para estos elementos es de 1710 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1781 Kg/cm².

4.3.14 Tensiones en las diagonales y montantes de los paralelos principales

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 25

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 5 (BEAM44)

Descripción: diagonales y montantes de los paralelos principales.

Perfil: CUADRADO 80·5

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	180
2	229
3	159
4	513
5	279
6	371
7	285
8	218
11	814
12	698
13	641
14	638
15	1060
16	948
17	490
18	301
19	271
20	256
21	215

TABLA 4.14
TENSIONES EN DIAGONALES Y MONTANTES DE PARALELOS PRINCIPALES

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 513 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 652 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1060 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1346 Kg/cm².

4.3.15 Tensiones en los cordones exteriores unidos a la chapa de los meridianos y paralelos secundarios

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 30

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 6 (BEAM44)

Descripción: cordón exterior unido a la chapa de los meridianos y paralelos secundarios.

Perfil: LPN-70·7

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)	Observaciones
1	572	
2	452	
3	460	
4	1040	
5	1040	
6	526	
7	688	
8	463	
11	1720	Efecto local (1340)
12	1660	Efecto local (unión viga arco) (1280)
13	1460	
14	1000	
15	1220	
16	1400	Efecto local (unión viga arco) (1240)
17	1300	
18	332	
19	456	
20	484	
21	568	

TABLA 4.15
TENSIONES EN CORDONES EXTERIORES DE MERIDIANOS Y PARALELOS SECUNDARIOS

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 1040 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1241 Kg/cm². En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1720 Kg/cm². En las combinaciones 10, 12 y 16 existen unos efectos locales en la zona de unión con la viga arco debido al modelo de elementos finitos. Existe también otro efecto local en la hipótesis de carga 11. Se trata sin embargo de efectos locales del modelo que, a efectos globales no deben ser tenidos en cuenta. Sin esos efectos el valor de la máxima tensión que puede considerarse para estos elementos es de 1460 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo 2052 Kg/cm².

4.3.16 Tensiones en los cordones interiores de los meridianos y paralelos secundarios

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 31

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 7 (BEAM44)

Descripción: cordones interiores de los meridianos y paralelos secundarios unidos al aislamiento interior.

Perfil: CUADRADO 70·4

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	263
2	246
3	273
4	453
5	389
6	330
7	371
8	205
11	613
12	788
13	453
14	515
15	613
16	847
17	467
18	226
19	226
20	211
21	183

TABLA 4.16
TENSIONES EN CORDONES INTERIORES DE MERIDIANOS Y PARALELOS SECUNDARIOS

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 453 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 529 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 847 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 989 Kg/cm².

4.3.17 Tensiones en los montantes de los meridianos secundarios

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 32

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 7 (BEAM44)

Descripción: montantes entre los cordones exterior e interior dispuestos en dirección radial de los meridianos secundarios.

Perfil: LPN-70·7

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	312
2	321
3	259
4	781
5	715
6	448
7	495
8	299
11	1090
12	1660
13	1180
14	834
15	1280
16	1640
17	1040
18	246
19	333
20	328
21	215

TABLA 4.17
TENSIONES EN MONTANTES DE MERIDIANOS SECUNDARIOS

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 715 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1015 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1660 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 2357 Kg/cm².

4.3.18 Tensiones en los cordones exteriores de las celosías laterales de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 49

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: cordones exteriores de las celosías laterales de las compuertas de observación.

Perfil: 2 LPN-80·8

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	85
2	119
3	88
4	260
5	196
6	231
7	218
8	95
11	459
12	335
13	311
14	243
15	476
16	1760
17	206
18	59
19	78
20	54
21	73

TABLA 4.18
TENSIONES EN CORDONES EXTERIORES DE LA CELOSÍAS LATERALES DE LAS COMPUERTAS
DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 260 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 291 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1760 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1971 Kg/cm².

4.3.19 Tensiones en los cordones interiores de las celosías laterales de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 50

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: cordones interiores de las celosías laterales de las compuertas de observación.

Perfil: 2 LPN-80·8

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	275
2	287
3	244
4	721
5	598
6	663
7	609
8	307
11	1260
12	1250
13	1100
14	715
15	1420
16	811
17	623
18	235
19	273
20	244
21	242

TABLA 4.19
TENSIONES EN CORDONES INTERIORES DE LAS CELOSÍAS LATERALES DE LAS COMPUERTAS
DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 721 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1118 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1420 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 2201 Kg/cm².

4.3.20 Tensiones en los montantes de las celosías de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 51

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: montantes de las celosías laterales y longitudinales de las compuertas de observación.

Perfil: 2 CUADRADOS 50·4

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	226
2	200
3	172
4	551
5	428
6	457
7	381
8	180
11	970
12	736
13	898
14	548
15	1000
16	441
17	479
18	119
19	193
20	103
21	121

TABLA 4.20
TENSIONES EN LOS MONTANTES DE LAS CELOSÍAS DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 551 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 573 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1000 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1040 Kg/cm².

4.3.21 Tensiones en las diagonales de las celosías laterales de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 52

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: diagonales de las celosías laterales de las compuertas de observación.

Perfil: 2 CUADRADOS 50·4

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	209
2	254
3	186
4	575
5	440
6	523
7	481
8	227
11	1070
12	678
13	633
14	501
15	1090
16	334
17	404
18	123
19	156
20	84
21	130

TABLA 4.21
TENSIONES EN LAS DIAGONALES DE LAS CELOSIAS LATERALES DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 575 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 719 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1090 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1363 Kg/cm².

4.3.22 Tensiones en los cordones de las celosías longitudinales de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 53

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: cordones de las celosías longitudinales soldadas a las celosías laterales de las compuertas de observación.

Perfil: CUADRADO 70·4

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	197
2	292
3	190
4	525
5	387
6	436
7	381
8	190
11	1030
12	966
13	1010
14	571
15	1060
16	636
17	571
18	95
19	170
20	104
21	96

TABLA 4.22
TENSIONES EN CORDONES DE CELOSÍAS LONGITUDINALES DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 525 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 653 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 1060 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 1319 Kg/cm².

4.3.23 Tensiones en las diagonales de las celosías longitudinales de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 54

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 9 (BEAM44)

Descripción: diagonales de las celosías longitudinales soldadas a las celosías laterales de las compuertas de observación.

Perfil: CUADRADO 50·4

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	88
2	136
3	127
4	285
5	217
6	260
7	262
8	127
11	488
12	320
13	307
14	235
15	465
16	179
17	151
18	55
19	81
20	49
21	52

TABLA 4.23
TENSIONES EN DIAGONALES DE LAS CELOSIAS LONGITUDINALES DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 285 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 373 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 488 Kg/cm². Con coeficiente de pandeo: 639 Kg/cm².

4.3.24 Tensiones en la chapa de cierre principal de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 55

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 10 (SHELL63)

Descripción: chapa de cierre principal en la cara superior de las compuertas de observación de 5 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	173
2	217
3	204
4	532
5	426
6	472
7	458
8	216
11	702
12	328
13	304
14	320
15	562
16	197
17	268
18	116
19	81
20	105
21	117

TABLA 4.24

TENSIONES EN CHAPA DE CIERRE PRINCIPAL DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 532 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 702 Kg/cm².

4.3.25 Tensiones en la chapa de cierre frontal de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 56

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 10 (SHELL63)

Descripción: chapa de cierre frontal de las compuertas de observación de 10 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	177
2	195
3	76
4	372
5	233
6	289
7	183
8	189
11	853
12	301
13	550
14	401
15	698
16	206
17	423
18	160
19	121
20	143
21	179

TABLA 4.25
TENSIONES EN CHAPA DE CIERRE FRONTAL DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 372 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 853 Kg/cm².

4.3.26 Tensiones en la chapa de cierre lateral de las compuertas de observación

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 57

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 10 (SHELL63)

Descripción: chapa de cierre lateral de las compuertas de observación de 10 mm de espesor.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)
1	207
2	271
3	235
4	493
5	425
6	490
7	453
8	218
11	741
12	352
13	368
14	307
15	645
16	245
17	194
18	124
19	100
20	105
21	115

TABLA 4.26
TENSIONES EN CHAPA DE CIERRE LATERAL DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 493 Kg/cm².

En condiciones extremas la tensión máxima alcanza los 741 Kg/cm².

4.3.27 Tensiones en el elemento estructural existente por encima de la viga arco

Número de referencia de la constante real asociada a estos elementos: 61

Número de referencia del tipo de elemento empleado: 12 (BEAM44)

Descripción: elemento estructural que se encuentra por encima de la viga arco.

Perfil: sección compuesta.

HIPÓTESIS	σ_{co} kg/cm ² (máxima)	Observaciones
1	440	
2	664	
3	507	
4	1030	
5	693	
6	1020	
7	860	
8	564	
11	1860	Efecto local (zona unión compuerta)
12	891	
13	839	
14	557	
15	1810	Efecto local (zona unión compuertas)
16	683	
17	939	Efecto local
18	231	
19	280	
20	180	
21	264	

TABLA 4.27
TENSIONES EN EL ELEMENTO ESTRUCTURAL ENCIMA DE LA VIGA DE ARCO

La máxima tensión que se alcanza en condiciones de servicio es de 1030 Kg/cm².

El valor de la máxima tensión que puede considerarse para estos elementos es de 1860 Kg/cm².

4.3.28 Desplazamientos (U_{sum}) máximos obtenidos en el modelo global en cada una de las combinaciones de carga

HIPÓTESIS	U_{sum} mm (máxima)	Observaciones	Máximos desplazamientos radiales en las zonas de plataforma con cargas mayoradas (mm)
1	5,5	Figura 4.1	2,1
2	5,8	Figura 4.2	1,7
3	3,7	Figura 4.3	2,1
4	6,8	Figura 4.4	1,0
5	8,3	Figura 4.5	2,7
6	9,4	Figura 4.6	2,2
7	6,6	Figura 4.7	2,7
8	3,8	Figura 4.8	1,8
11	20,4	Figura 4.9	4,4
12	12,9	Figura 4.10	5,7
13	12,6	Figura 4.11	4,0
14	14,4	Figura 4.12	6,3
15	19,6	Figura 4.13	3,9
16	13,0	Figura 4.14	5,4
17	13,4	Figura 4.15	4,0
18	3,3	Figura 4.16	1,5
19	2,6	Figura 4.17	1,6
20	3,0	Figura 4.18	1,8
21	3,8	Figura 4.19	1,0

TABLA 4.30
DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS

El máximo desplazamiento que se alcanza en condiciones de servicio y con cargas mayoradas es de 9,4 mm. El máximo desplazamiento en dirección radial, a la altura de las plataformas de acceso a las plataformas Nasmyth del telescopio, en estas condiciones es de 4,5 mm (con cargas mayoradas).

En condiciones extremas el desplazamiento máximo alcanzado es de 20,4 mm. El máximo desplazamiento en dirección radial, a la altura de las plataformas, en estas condiciones es de 6,3 mm (con cargas mayoradas).

4.4 ESTUDIO DE LOS SOPORTES DE LAS GRÚAS BOOM Y ZENITAL Y DE SU INFLUENCIA SOBRE EL RESTO DE LA ESTRUCTURA

Un estudio detallado del soportado de las grúas Boom y Zenital se realiza en el apartado B.3.

Cada una de las grúas, boom y zénit, se soportan en la estructura de la cúpula mediante un tubo vertical $\varnothing$ 355 mm y 12,7 mm de espesor que cuelga de la viga de arco y mediante dos

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 59 de 145
---	--	---

perfiles HEB200 ligeramente inclinados con respecto a la horizontal que se unen uno a la viga de arco y otro a la intersección más próxima de meridiano y paralelo (DP 27 y 28).

Se prepara para cada grúa un modelo sencillo de elementos finitos que representa los soportes antes descritos y el tramo vertical entre bridas de la grúa.

Bajo la acción de las cargas transmitidas por las grúas se analizan dichos modelos para obtener las tensiones en los soportes y las reacciones en los apoyos. Dichas reacciones se introducirán posteriormente en el modelo global de la cúpula para su validación.

Dado que las grúas pueden girar alrededor del eje vertical que definen sus apoyos, se analiza estados de tensiones en los soportes de las grúas así como reacciones máximas en los apoyos para diferentes ángulos de giro de las grúas.

El máximo desplazamiento observado es de 0,5 mm. La máxima tensión de Von Mises obtenida se produce en el tubo vertical de soportado alcanzando un valor de 1250 kg/cm^2 ($\theta = 97,23^\circ$) para la grúa zenit y 866 kg/cm^2 ($\theta = 82,98^\circ$) para la grúa boom. Dichos valores están suficientemente alejados del límite elástico del acero y son por tanto aceptables. El ángulo θ se toma como giro respecto a la viga de arco.

Para cálculo de los estados de tensiones en el modelo global de la grúa, se multiplican las reacciones obtenidas en los distintos ángulos σ , por un coeficiente de seguridad 1.5 y se introducen estas reacciones en el modelo global.

En la viga de arco se observa una máxima tensión de von Mises de 2440 kg/cm^2 en el punto de anclaje del tubo vertical de la grúa zenit. Esta tensión será en realidad mucho menor puesto que la rigidización local de la viga de arco en dicha zona no está contemplada en el modelo global de elementos finitos.

La máxima tensión de von Mises en vigas se produce en uno de los cordones del paralelo donde se sujeta el arrostramiento lateral de la grúa zenit (2010 kg/cm^2).

Teniendo en cuenta que la grúa no actuará en condiciones normales, cuando concurren condiciones extremas de carga, se considera que el nivel de esfuerzos que implica la actuación de las grúas es poco significativa y muy localizada, por lo que no será incluido en las combinaciones de carga.

Del mismo modo se deduce que el nivel de desplazamientos es también muy localizado y de pequeño valor, aun teniendo en cuenta que los resultados obtenidos corresponden a un modelo sin rigidizar en la zona de anclaje de las grúas.

4.5 ANÁLISIS DE PANDEO

Adicionalmente a los cálculos que indica la norma EA/95 para la comprobación de perfiles, se realiza con ANSYS un análisis de pandeo de la estructura tanto en su configuración con compuerta abierta como con compuerta cerrada bajo las cargas que se consideran más desfavorables.

4.5.1 Modelo con compuerta cerrada

Se realiza con ANSYS un análisis a pandeo para las siguientes combinaciones de carga:

$$1,33 \text{ (PP)} + 1,5 \text{ (NIEVE)}$$

$$1,33 \text{ (PP)} + 1,5 \text{ (VIENTO EXTREMO DIRECCIÓN X)}$$

El programa ANSYS no detecta ningún fenómeno de inestabilidad global para ninguna de esas combinaciones de carga. A la vista de los resultados obtenidos tan solo se observan pequeñas deformaciones en la zona superior de la cúpula que se tendrán en cuenta a la hora de reforzar esa parte de la estructura.

4.5.2 Modelo con compuerta abierta

Se realiza con ANSYS un análisis a pandeo para la siguiente hipótesis:

$$1,33 \text{ (PP)} + 1,5 \text{ (NIEVE)}$$

El programa ANSYS no detecta ningún fenómeno de inestabilidad global para esta combinación de carga (resultando el análisis más favorable que el realizado para compuertas cerradas).

4.5.3 Conclusiones

La estructura no presenta ningún problema de inestabilidad global para las cargas consideradas.

En el apartado de comprobación de perfiles se han indicado las tensiones obtenidas aplicando los coeficientes de pandeo aplicables, según la normativa vigente, para el cálculo de tensiones de comparación.

4.6 CARGAS EN LOS CARRETONES DE LA BASE DE LA CÚPULA

Un estudio detallado del cálculo de estas cargas se realiza en el apartado B.4.

De los análisis realizados se obtienen los resultados que se resumen en la siguiente tabla donde se proporcionan los valores máximos de las reacciones obtenidas tanto para las condiciones de servicio como para las condiciones extremas (los valores de las reacciones se dan en toneladas).

	MÁXIMAS REACCIONES EN CARRETONES (Tn)			
	CONDICIONES DE SERVICIO		CONDICIONES EXTREMAS	
	RADIALES	VERTICALES	RADIALES	VERTICALES
CARRETÓN SIMPLE (1)	0,9 / -1,5	10,3	5,3 / -7,9	17,6 / -4,6
CARRETÓN DOBLE (2)	2,0 / -3,1	16,9	9,7 / -16,3	24,0 / -10,4

TABLA 4.31
REACCIONES EN CARRETONES (Tn)

Las condiciones de servicio se corresponden con un viento de 27 m/s y las condiciones extremas se corresponden con viento de 67 m/s, nieve, sismo, ...

- (1) Las reacciones en carretones simples se dan para cada una de las ruedas del carretón.
- (2) Las reacciones en carretones dobles se dan para cada conjunto de 2 ruedas del carretón.

La holgura requerida entre los rodillos de los carretones que impiden el desplazamiento radial y el raíl es de $h \geq 5$ mm.

4.7 CARGAS EN LOS CARRETONES Y CADENAS DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

Un estudio detallado de estas cargas se realiza en los apartados B.5 y B.6.

En las tablas que siguen se resumen los valores máximos (en toneladas) de las reacciones en carretones y cadenas existentes en las compuertas de observación obtenidos de los análisis estructurales realizados.

Compuerta superior (compuerta de 90°)

	RADIAL	LATERAL	CADENAS
C. OPERACIÓN	4,2 / -4,2	0,9	16,8
C. EXTREMAS	14,0 / -11,8	13,2	29,7

TABLA 4.32
CARGAS EN CARRETONES DE LA COMPUERTA SUPERIOR

Compuerta inferior (compuerta de 27°)

	RADIAL	LATERAL	CADENAS
C. OPERACIÓN	2,4 / -2,0	4,1	6,8
C. EXTREMAS	10,2 / -10,3	13,8	11,3

TABLA 4.33
CARGAS EN CARRETONES DE LA COMPUERTA INFERIOR

5. ANÁLISIS DINÁMICOS

Se realizan análisis modales de los modelos con compuertas abiertas y cerradas, en las condiciones más desfavorables, para determinar las frecuencias propias de la estructura en ambas configuraciones. Cualquier otro estado intermedio entre compuerta abierta y compuerta cerrada dará valor de frecuencias propias intermedias entre los valores proporcionados.

5.1 CONDICIONES DE CONTORNO

Tanto para el modelo con compuertas abiertas como para el de compuertas cerradas, se ha efectuado un análisis modal en el que se han considerado impedidos los desplazamientos radiales, tangenciales y verticales de los nudos correspondientes a la parte inferior de los carretes. El que se hayan impedido los desplazamientos tangenciales de los carretes de la base de la cúpula no limita los resultados obtenidos del análisis ya que, una vez construida la estructura, el movimiento de los carretes se encontrará controlado por los motores de los carretes que impedirán que la cúpula pueda girar libremente sobre su base.

Los carretes se han simulado con elementos barra que son capaces de transmitir el mismo tipo de cargas hacia la estructura que en la realidad.

Se extraen únicamente cinco modos porque tan solo nos interesa determinar las frecuencias más bajas de la estructura

5.2 ANÁLISIS MODAL CON COMPUERTAS ABIERTAS

Para el análisis modal realizado se ha pedido al programa la extracción de las cinco primeras frecuencias propias de la estructura. En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos con el modelo con compuertas abiertas para las tres direcciones.

La masa total del modelo con compuertas abiertas es de 367240 Kg.

5.2.1 Resultados en dirección X

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	4.31000	0.23202	-1.2628	0.003835	1.59455	0.775173E-05
2	4.32997	0.23095	171.40	0.520602	29378.8	0.142830
3	6.94348	0.14402	329.24	1.000000	108398.	0.669796
4	7.91516	0.12634	0.29236	0.000888	0.854771E-01	0.669797
5	10.2719	0.97353E-01	-260.62	0.791588	67923.7	1.000000
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					205703.	

TABLA 5.1
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN X (COMPUERTAS ABIERTAS)

Ver figuras 5.2 y 5.3

5.2.2 Resultados en dirección Y

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	4.31000	0.23202	304.03	1.000000	92443.6	0.531496
2	4.32997	0.23095	2.2520	0.007407	5.07167	0.531525
3	6.94348	0.14402	-0.18930	0.000623	0.358327E-01	0.531525
4	7.91516	0.12634	285.44	0.938843	81475.8	0.999999
5	10.2719	0.97353E-01	0.33809	0.001112	0.114308	1.000000
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					173917.	

TABLA 5.2
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN Y (COMPUERTAS ABIERTAS)

Ver figuras A5.1, A5.4 y A5.5

5.2.3 Resultados en dirección Z

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	4.31000	0.23202	-30.059	0.420481	903.559	0.150239
2	4.32997	0.23095	-0.20678	0.002893	0.427576E-01	0.150246
3	6.94348	0.14402	-0.70213E-01	0.000982	0.492987E-02	0.150247
4	7.91516	0.12634	71.488	1.000000	5110.50	0.999993
5	10.2719	0.97353E-01	-0.20370	0.002849	0.414941E-01	1.000000
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					6014.15	

TABLA 5.3
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN Z (COMPUERTAS ABIERTAS)

Ver figura A5.5

5.2.4 Conclusiones

Para el modelo con compuerta abierta los tres primeros modos son los siguientes:

- 1^{er} modo (4.31 Hz): flexión alrededor del eje X. Se excita una masa de 92436 Kg en dirección Y lo que supone un 25% de la masa total de la estructura.
- 2^o modo (4.33 Hz): flexión alrededor del eje Y. Se excita una masa de 29379 Kg en dirección X, lo que supone un 8% de la masa total de la estructura.
- 3^{er} modo (6.94 Hz): flexión alrededor del eje Y. Se excita una masa de 108398 Kg en dirección X, lo que supone un 30% de la masa total de la estructura.

Dada la proximidad existente entre las frecuencias propias correspondientes al primer y segundo modos, puede hablarse de que la estructura tiene, para esas frecuencias, un modo a torsión (aunque la masa excitada por el segundo modo es poco significativa).

La frecuencia propia más baja que presenta la estructura es de 4.31 Hz, lo que supone que presentará un comportamiento adecuado para no transmitir vibraciones al telescopio durante la observación.

Las frecuencias de excitación de viento, en condiciones normales de operación, están dadas por:

$$f = S \frac{V}{D}$$

S=	Número de Sthrouhal ≈ 0.2
V=	Velocidad de viento (10 m/s)
D=	Dimensión característica de la estructura ($D \approx 32$ m)

$$f = 0.2 \times \frac{10}{32} < 1 \text{ Hz}$$

Es decir, las frecuencias de excitación del viento sobre el conjunto de la estructura sería inferior a 1 Hz, muy alejada de la frecuencia mínima de resonancia de la estructura ≈ 4 Hz.

5.3 ANÁLISIS MODAL CON COMPUERTAS CERRADAS

Se realiza un análisis modal de la estructura y se extraen las cinco primeras frecuencias propias de la cúpula en su configuración con compuertas cerradas. En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos para las tres direcciones. (Ver anejo de figuras).

La masa total del modelo con compuertas abiertas es de 369720 Kg.

5.3.1 Resultados en dirección X

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	MASS FRACTION	CUMULATIVE
1	6.44173	0.15524	-0.12040	0.000243	0.144951E-01	0.590906E-07	
2	7.43265	0.13454	-495.02	1.000000	245043.	0.998936	
3	9.83074	0.10172	-16.154	0.032634	260.962	1.000000	
4	10.7429	0.93084E-01	-0.49037E-01	0.000099	0.240467E-02	1.000000	
5	11.9953	0.83366E-01	-0.39874E-01	0.000081	0.158993E-02	1.000000	
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					245304.		

TABLA 5.4
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN X (COMPUERTAS CERRADAS)

Ver figura A.5.6

5.3.2 Resultados en dirección Y

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	6.44173	0.15524	489.36	1.000000	239472.	0.972635
2	7.43265	0.13454	-0.11027	0.000225	0.121604E-01	0.972635
3	9.83074	0.10172	-0.10916	0.000223	0.119160E-01	0.972635
4	10.7429	0.93084E-01	28.803	0.058860	829.641	0.976005
5	11.9953	0.83366E-01	-76.862	0.157067	5907.79	1.000000
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					246209.	

TABLA 5.5
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN Y (COMPUERTAS CERRADAS)

Ver figura A.5.7

5.3.3 Resultados en dirección Z

Los resultados obtenidos se proporcionan en la siguiente tabla:

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	6.44173	0.15524	23.611	0.176753	557.471	0.222580E-01
2	7.43265	0.13454	-0.25878E-01	0.000194	0.669695E-03	0.222581E-01
3	9.83074	0.10172	-0.26311E-01	0.000197	0.692257E-03	0.222581E-01
4	10.7429	0.93084E-01	-133.58	1.000000	17843.8	0.734704
5	11.9953	0.83366E-01	-81.514	0.610224	6644.56	1.000000
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					25045.9	

TABLA 5.6
FRECUENCIAS PROPIAS DIRECCIÓN Z (COMPUERTAS CERRADAS)

Ver figura A.5.8

5.3.4 Conclusiones

Para el modelo con compuertas cerradas los tres primeros modos son los siguientes:

- 1^{er} modo (6.44 Hz): flexión alrededor del eje X. Se excita una masa 239472 Kg en dirección Y lo que supone un 65% de la masa total de la estructura.
- 2º modo (7.43 Hz): flexión alrededor del eje Y. Se excita una masa de 245043 Kg en dirección X, lo que supone un 66% de la masa total de la estructura.
- 3^{er} modo (9.83 Hz): frecuencia correspondiente a un modo local de escasa importancia.

La frecuencia propia más baja que presenta la estructura es de 6.44 Hz, lo que supone que presentará un comportamiento adecuado de la estructura en condiciones de operación (Ver apartado anterior).

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 66 de 145
---	--	---

6. MODELOS DE ANÁLISIS LOCALES

6.1 CARRIL DE RODADURA

6.1.1 Modelo de análisis

La cúpula descansa sobre una viga anillo de rodadura de 32 m de diámetro medio, situada en la base de la cúpula. Sobre ella se apoya el raíl de rodadura, para permitir el giro de la cúpula sobre su eje vertical.

El raíl es del tipo S/DIN 536 A120. Cada 700 mm se colocan las grapas de fijación a la viga anillo de rodadura. La transmisión de vibraciones al pedestal de la cúpula se minimizará incorporando elementos antivibratorios entre los elementos de rodadura y la viga anillo de rodadura. Se utiliza una banda tipo Gantrex.

La viga anillo de rodadura consiste en dos platabandas horizontales de 20 mm de espesor, 370 mm de ancho, separadas 162 mm. La inferior se fija al hormigón con pernos cada 1400 mm. Entre estas platabandas hay dos placas verticales de 15 mm de espesor separadas 75 mm del eje de simetría.

Se utiliza un modelo de elementos finitos para calcular las rigideces de la estructura, tensiones y distribución de fuerzas bajo distintos estados de carga.

Se analiza una longitud de arco de 30°, que corresponde a un módulo de transporte del raíl de rodadura y viga anillo de rodadura.

La modelización se ha realizado de la siguiente forma:

- Las placas circulares se modelizan utilizando elementos lámina tipo SHELL63 de 4 nodos, dando a cada una el espesor que le corresponde mediante las constantes reales del elemento.
- Las grapas de fijación del raíl se modelizan utilizando elementos barra tipo BEAM4 de 2 nodos con características de área e inercia equivalentes.
- El raíl y la banda elástica entre raíl y platabanda con la que se consigue eliminar desgastes, reducir ruidos, vibraciones y evitar corrosión, se modelizan utilizando elementos volumen tipo SOLID73 de 8 nodos.

Las condiciones de contorno impuestas han sido:

- Condiciones de simetría circunferencial en las secciones de los extremos.
- Impedidos los desplazamientos en los nodos correspondientes a los pernos de anclaje al hormigón.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 67 de 145
---	--	---

Se analizan tres casos de carga aplicando fuerzas de 10 Tn en una sección intermedia (a 15° de los extremos) y en la parte superior del raíl de rodadura. Los casos de carga analizados son:

- Fuerza radial (eje X)
- Fuerza tangencial (eje Y)
- Fuerza vertical (eje Z)

La figura 6.1. representa el modelo de elementos finitos de una sección del carril de rodadura.

6.1.2 Análisis, resultados

Los resultados del análisis se recogen en las siguientes tablas que representan lo siguiente:

Tabla 6.1. Máximas deformaciones producidas en el carril de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en los tres casos analizados: fuerza radial, fuerza tangencial y fuerza vertical.

Tabla 6.2. Rigideces del carril ante fuerza radial, tangencial y vertical.

Tabla 6.3. Reacciones máximas y tensiones que aparecen en los pernos de fijación al hormigón ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en los casos: fuerza radial, fuerza tangencial y fuerza vertical.

Tabla 6.4. Fuerzas máximas en las grapas de fijación del raíl a la viga anillo de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en los casos: fuerza radial, fuerza tangencial y fuerza vertical.

Tabla 6.5. Tabla de coeficientes de seguridad de tensiones en el raíl de rodadura y en la viga anillo de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en los casos: fuerza radial, fuerza tangencial y fuerza vertical. Estos coeficientes de seguridad se establecen frente a un límite elástico del material $\sigma_y = 275 \text{ N/mm}^2$.

Fuerzas y momentos expresados según el sistema de coordenadas local del elemento.

FUERZA	DEFORMACION (m)
RADIAL	$0.508 \cdot 10^{-3}$
TANGENCIAL	$0.38 \cdot 10^{-4}$
VERTICAL	$0.231 \cdot 10^{-3}$

TABLA 6.1.
MÁXIMAS DEFORMACIONES

FUERZA	RIGIDECES (N / m)
RADIAL	$1.97 \cdot 10^8$
TANGENCIAL	$26.3 \cdot 10^8$
VERTICAL	$4.3 \cdot 10^8$

TABLA 6.2.
RIGIDEZ DEL CARRIL DE RODADURA

FUERZA	FX (N)	FY(N)	FZ(N)
RADIAL	31500	42300	-45193
TANGENCIAL	-1803	14868	-3128
VERTICAL	-4788	-16014	53128

TABLA 6.3.
REACCIONES Y TENSIONES EN PERNOS DE UNION AL HORMIGON

FUERZA	FX(N)	FY(N)	FZ(N)	F _{adm} (n)
RADIAL	-24865	-30000	2290	125000
TANGENCIAL	-3900	12400	2051	125000
VERTICAL	-12604	-24661	-8598	125000

TABLA 6.4.
REACCIONES EN GRAPAS DE FIJACIÓN DEL CARRIL

FUERZA	RAIL	VIGA
RADIAL	7.4	4
TANGENCIAL	10.2	101
VERTICAL	6	5.85

TABLA 6.5.
COEFICIENTES DE SEGURIDAD

Los desplazamientos producidos son muy reducidos por lo que no se prevé ninguna dificultad para el movimiento de la cúpula.

Elevados coeficientes de seguridad.

En la figura 6.2 se observan las tensiones que aparecen en el carril de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en sentido radial.

En la figura 6.3 se observan las tensiones que aparecen en el carril de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en sentido tangencial.

En la figura 6.4 se observan las tensiones que aparecen en el carril de rodadura ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en sentido vertical.

6.1.3 Cálculo Banda Elástica

Se ha realizado el estudio teórico de las tensiones y deformaciones para el conjunto raíl banda elástica.

La tensión en la placa es máxima en el punto localizado debajo de la carga de la rueda convirtiéndose en un levantamiento a una distancia de aproximadamente 1.2 veces la longitud característica (s), siendo s para el carril A120 utilizado de 429 mm. Esta tensión máxima viene dada por la expresión:

$$\sigma_{\text{placa}} = P * Pf$$

P= Carga debajo de la rueda KN

Pf= Factor de tensión en la placa elástica, para carril A120 (Pf= 0.0111)

Para una carga de 10 Tn, tensión en la placa elástica $\sigma_{\text{placa}} = 1.11 \text{ N/mm}^2$.

La placa de asiento para carriles de grúa aceptará tensiones funcionales de hasta 10 N/mm²., con lo que se tiene un coeficiente de seguridad de 9.

Entrando con este valor en la curva de deformación bajo carga para la placa, se tiene una deformación de 2% ($\cong 0.15 \text{ mm}$).

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 70 de 145
---	--	---

El uso de la placa elástica para aumentar la longitud de carril sobre la que se reparte la carga bajo la rueda conduce siempre un aumento de la tensión de flexión producida en el carril. Aparece la máxima tensión de flexión inmediatamente debajo de la rueda, y su valor viene dado por:

$$\sigma_{\text{carril}} = P * R_f$$

R_f = Factor de tensión en el carril, para carril a 120 ($R_f = 0.215$)

$$\sigma_{\text{carril}} = 21.5 \text{ N/mm}^2 \ll \sigma_y$$

6.1.4 Frecuencia de oscilación del conjunto viga carril

A partir de la rigidez radial y tangencial, se obtiene la rigidez media del anillo en dirección horizontal en el punto de aplicación de la carga.

$$K = 14.135 * 10^8 \text{ N / m}$$

Con este valor se obtiene la frecuencia de oscilación del carril, considerando un peso de cúpula de 450 Tn.

$$f = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{K * N}{M}}$$

N = Número total de carretes, 20.

M = Masa total de la cúpula, 450 Tn.

$$f = 39.9 \text{ Hz.}$$

Esta frecuencia está alejada de la frecuencia de excitación del viento por lo que no aparecen problemas de vibraciones debidas a la rigidez del conjunto anillo más raíl de rodadura.

6.1.5 Comprobación del anclaje del anillo al hormigón

6.1.5.1 Carga máxima por perno de anclaje al hormigón

De acuerdo a los datos de la tabla 4.3.1, los valores de cargas máximas transmitidas por una rueda de los carretes de la Cúpula, en direcciones vertical y radial bajo condiciones extremas, son $F_v = -10.4/2$ y $F_R = -16.3/2$. Consideramos el valor de F_v negativa, dado que la fuerza positiva es absorbida principalmente por el hormigón sobre el que apoya el anillo base del carril de rodadura.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 71 de 145
---	--	---

Entrando con estos datos en la tabla 6.3 en donde se dan los valores de las reacciones en los pernos de anclaje para valores de carga de 10 Tn en la parte superior del raíl de rodadura, obtenemos unos valores de reacciones máximos en los pernos de anclaje de:

$$\text{Fuerza vertical } F_z = 53128 \frac{10.4}{2 \times 10} N + 45193 \frac{16.3}{2 \times 10} N \equiv 6.5 T_n$$

$$\text{Fuerza cortante } F_c = (4788^2 + 16014^2)^{1/2} \frac{10.4}{2 \times 10} N + (31500^2 + 42300^2)^{1/2} \frac{16.3}{2 \times 10} N \equiv 5.2 T_n$$

En la tabla 6.6 se da un resumen de las cargas máximas sobre los pernos de la cimentación

6.1.5.2 Estados de tensiones de los pernos

De acuerdo al DP36, los pernos de anclaje M24 son de material ST 52-3, con las características siguientes:

$$\sigma_y = 355 \text{ MPa (límite elástico mínimo)}$$

Con los valores de carga máxima en el perno de anclaje al hormigón, se obtienen unos valores de tensión máxima en el perno de:

$$\sigma_{max} = \sqrt{\left(\frac{F_z}{A_c}\right)^2 + 3\left(\frac{F_c}{A_c}\right)^2} = 184 \text{ MPa}$$

$$A_c = 353 \text{ mm}^2 \text{ (Sección resistente del perno M24)}$$

Tenemos un factor de seguridad frente al límite elástico del material para este caso de cargas dado bajo condiciones extremas de $N = 355/184 = 1.93$.

6.1.5.3 Comprobación de la unión del perno al hormigón

El hormigón en donde van anclados los pernos es del tipo Bettogront (DP 34,35), con una resistencia a compresión superior a 90 MPa.

Los pernos M24 son de barra lisa, con una placa de fondo de anclaje de dimensiones de 60 x 60 x 20 mm.

La capacidad de cargas de extracción máxima en cada uno de los pernos estará dada por la carga soportada por la adherencia hormigón-perno más la carga soportada por la placa de fondo.

De acuerdo al documento DP34, la resistencia a la adherencia entre este tipo de hormigón de relleno y una barra lisa es de $f_{cb} = 2.28 \text{ MPa}$, que si multiplicamos por el área perimetral de contacto perno hormigón nos da una fuerza de extracción de:

$$F_1 = 2.28 \times \pi \times 24 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \equiv 8.6 T_n$$

La carga soportada por la placa de 60 x 60 x 20 mm, estará dada por la carga menor de las cargas siguientes:

- Carga transmitida directamente por compresión del hormigón en contacto con la placa, considerando una resistencia de compresión del hormigón de 90 MPa

$$F_2 = \left(60 \times 60 \text{ mm}^2 - \frac{\pi 24^2}{4} \text{ mm}^2 \right) \times 90 \text{ MPa} \equiv 28 T_n$$

- Carga máxima transmitida por la soldadura del perno a la placa, considerando un cordón de soldadura de 5 mm y un límite elástico $\sigma_y = 275 \text{ MPa}$ del material de aporte.

$$F_3 = \left(\pi \times 24 \times 5 \times \sqrt{2} \text{ mm}^2 \right) \times \frac{275}{2} \equiv 7.3 T_n$$

Por lo tanto la capacidad de carga de extracción de estos pernos de anclaje será $F = F_1 + F_3 \equiv 16 T_n$, muy superior al valor de $F_Z = 6.5 T_n$.

En el documento DP34, se calcula la capacidad de carga de extracción de la unión mortero-hormigón, siendo ésta de $88.3 T_n$, muy superior a $F = 16 T_n$.

Por otra parte, la fuerza cortante F_C , será absorbida por la tensión de compresión entre el hormigón y la barra del perno. Considerando un valor de tensión de compresión máxima del hormigón de 90 MPa, la unión hormigón-perno de anclaje será capaz de soportar una carga máxima de

$$F_4 = 24 \times 500 \text{ mm}^2 \times 90 \text{ MPa} \equiv 108 T_n$$

El valor de F_4 es muy superior al valor de $F_C = 5.2 T_n$.

Las cargas máximas en los pernos de la cimentación son las dadas en la tabla 6.6.

CARGAS MÁXIMAS EN PERNOS DE CIMENTACIÓN

	Fuerza vertical	Fuerza cortante
CONDICIONES EXTREMAS	+13 T_n (*)	7.2 T_n
	-6.5 T_n	5.2 T_n
CONDICIONES OPERACIÓN	5 T_n (*)	3 T_n

Tabla 6.6
CARGAS POR CADA UNO DE LOS PERNOS DE ANCLAJE

(*) Las fuerzas verticales (*) son de presión hacia abajo y serán soportadas por el perno y por el contacto raíl-hormigón de la base.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 73 de 145
---	--	---

6.2 VIGA DE RODADURA SOBRE VIGAS ARCO

6.2.1 Modelo de análisis

Las dos vigas arco paralelas a 12.5 m de distancia la una de la otra que delimitan la abertura de observación sirven como camino de rodadura de las compuertas de observación.

Sobre las vigas arco se suelda una viga sobre la que apoyan los carretes de las compuertas.

La viga de rodadura está en el extremo exterior de la viga arco y consiste en:

- dos placas verticales de 10 mm de espesor separadas una distancia de 110 mm, la placa exterior tiene 255 mm de alto y la interior 195 mm.
- dos placas horizontales en la parte superior de 10 mm de espesor separadas una distancia de 60 mm y de 130 mm de ancho
- un raíl de 60x60 mm soldado a los extremos interiores de las placas horizontales.

Los carretes están formados por tres rodillos que actúan sobre el raíl de la viga de rodadura: a) uno que aplica una fuerza radial hacia fuera b) otro que ejerce una fuerza radial hacia el interior de la cúpula y c) otro que ejerce una fuerza tangencial. Dependiendo del punto de la viga en la que se encuentre el carrete y de las cargas actuantes, aparecerá una fuerza hacia dentro o una fuerza hacia fuera sobre el raíl.

Para realizar el análisis local se toma un arco de 17° y la mitad de la altura de la viga arco.

La modelización se ha realizado de la siguiente forma:

- Las placas de la estructura se modelizan utilizando elementos lámina tipo SHELL63 de 4 nodos, los diferentes espesores se especifican en las constantes reales del elemento.
- El raíl se modeliza utilizando elementos volumen tipo SOLID73 de 8 nodos.

Las condiciones de contorno impuestas han sido:

- Impedidos los desplazamientos y giros en los extremos.
- Impedido el desplazamiento horizontal en la base de la viga arco utilizada en el modelo.

Los tres estados de carga analizados han sido:

- Fuerza hacia fuera de valor $F = 10 \text{ Tn}$ (en dirección radial , $-X^{(1)}$).
- Fuerza hacia dentro de valor $F = 10 \text{ Tn}$ (en dirección radial , $+X^{(1)}$).
- Fuerza tangencial sobre el carril de valor $F = 10 \text{ Tn}$ (en dirección $+Z^{(1)}$).

La figura A.6.5. representa el modelo de elementos finitos de la viga de rodadura sobre las vigas de arco.

6.2.2 Análisis, resultados

Los resultados del análisis se recogen en las siguientes tablas que expresadas en unidades del sistema internacional (N,m) representan lo siguiente:

Tabla 6.7. Máximas deformaciones producidas en el carril antivuelco ante la aplicación de una fuerza radial hacia fuera de 10 Tn, una fuerza radial hacia dentro de 10 Tn y una fuerza tangencial de 10 Tn.

Tabla 6.8. Tabla de coeficientes de seguridad de tensiones en la viga arco, en las placas verticales, en las placas horizontales y en el raíl ante la aplicación de una fuerza radial hacia fuera de 10 Tn, una fuerza radial hacia dentro de 10 Tn y una fuerza tangencial de 10 Tn.

FUERZA	DEFORMACION (m)
HACIA FUERA	$0.894 \cdot 10^{-3}$
HACIA DENTRO	$0.894 \cdot 10^{-3}$
TANGENCIAL	$1.9 \cdot 10^{-3}$

TABLA 6.7
MÁXIMAS DEFORMACIONES

FUERZA	VIGA	PLACAS	PLACAS	RAIL
HACIA FUERA	5	2.7	1.77	4.45
HACIA DENTRO	5	2.7	1.77	4.45
TANGENCIAL	7.2	2.2	2.9	2.5

TABLA 6.8
COEFICIENTES DE SEGURIDAD

Nota (1)- Sistema de coordenadas cilíndrico, con centro en las vigas de arco

En los casos en los que los coeficientes de seguridad son menores, se debe a tensiones elevadas puntuales que aparecen en los puntos de aplicación de las cargas.

Los desplazamientos son reducidos por lo que no aparece ninguna dificultad para el movimiento de las compuertas de observación.

En la figura A.6.6. se observan las tensiones que aparecen en el carril antivuelco ante la aplicación de una fuerza radial de 10 Tn hacia fuera.

En la figura A.6.7. se observan las tensiones que aparecen en el carril antivuelco ante la aplicación de una fuerza radial de 10 Tn hacia dentro.

En la figura A.6.8. se observan las tensiones que aparecen en el carril antivuelco ante la aplicación de una fuerza de 10 Tn en sentido tangencial.

6.3 PANTALLA DE PROTECCION ANTIVIENTO

6.3.1 Modelo de análisis

El aire que entra por la abertura de la cúpula a la cámara del telescopio se controla mediante una pantalla de protección antiviento que tiene las siguientes características:

Número total de lamas:	19
Altura de cada lama :	0.9 m
Ancho de cada lama :	12.28 m
Espesor de la chapa de la primera lama :	3 mm
Espesor de la chapa del resto de lamas:	2 mm
Marcos horizontales :	50 x 5 mm
Marcos verticales :	5 x 20 mm
Marcos diagonales:	5 x 20 mm
Marcos verticales laterales:	70 x 5 mm
Marcos inclinados :	70 x 5 mm
Distancia entre marcos verticales:	0.9 m

Las lamas están unidas mediante bisagras a todo lo largo de su arista de unión.

Las lamas se unen en los laterales a unos tirantes en forma de pletina. Los tirantes de pletina se componen de piezas de unos 900 mm de largo, en forma de pletina de 100 x 10 mm que llevan en sus extremos unos mecanizados formando una bisagra de gran resistencia.

Cada bisagra de los tirantes laterales se compone de un bulón de $\varnothing 40$ mm que une los extremos de las pletinas de los tirantes. Estos extremos de pletinas tienen forma cilíndrica de $\varnothing_{ext} = 60$ mm y $\varnothing_{int} = 40$ mm para el paso del bulón.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 76 de 145
---	--	---

El bulón $\varnothing$ 40 mm de cada bisagra lateral tiene una longitud de 180 mm y lleva en su extremo una rueda de $\varnothing$ 60 mm que se coloca en el interior de unas guías colocadas en los laterales de la viga arco.

La pantalla antiviento se despliega sobre estas guías laterales.

La pantalla no dispone de accionamiento propio y para desplegarla se aprovecha el movimiento de elevación de la compuerta pequeña. Esto se hace mediante un mecanismo que permite enganchar y desenganchar la pantalla antiviento. Este mecanismo consiste en dos piezas en forma de H fijas a los laterales de la parte superior de la primera bisagra. Cada una de estas H siempre se mantiene vertical ya que está unida a dos ruedas que deslizan sobre las guías de rodadura: una la que corresponde al bulón que une la pieza a la bisagra de la primera lama y la otra que corresponde a un bulón que se suelda al lado de la H próximo a la guía. El marco horizontal superior de la primera lama es un perfil UPN-120 para dar más inercia. En la parte superior de la H se coloca un actuador que controla la posición de un bulón. En la compuerta hay una lengüeta que encaja en el hueco superior de la H y tiene un orificio para que pase el bulón en caso de enganche de la pantalla antiviento. Existe un sensor para conocer la posición de la pantalla: el enganche y desenganche sólo se realiza cuando la compuerta está en una determinada posición.

Cuando no esté utilizándose esta pantalla se almacena debajo de la abertura de la cúpula.

Para el análisis estructural se modelizan 18 lamas desplegadas y se somete a la carga de 45.6 Kg/m² (27 m/s); si la velocidad del viento supera este valor las compuertas deben estar cerradas y la pantalla no actúa. La carga del viento no se aplica en las 5 primeras lamas porque están protegidas por la compuerta.

La modelización se ha realizado de la siguiente forma:

- Debido a la simetría de la pantalla se modeliza la mitad
- La chapa de las lamas se modelizan utilizando elementos lámina tipo SHELL63 de 4 nodos, especificando su espesor en las constantes reales del elemento.
- Los marcos y las bisagras se modelizan utilizando elementos barra tipo BEAM4 de 2 nodos con características de área e inercia equivalentes.
- El perfil UPN-120 se modeliza utilizando elementos barra tipo BEAM 44 de 2 nodos con características de área e inercia equivalentes.

Las condiciones de contorno impuestas son:

- Impedidos los desplazamientos en sentido radial de la cúpula (eje X) en la parte inferior de la última lama que se encuentra enganchada.
- Impedidos los desplazamientos en sentido radial de la cúpula (eje X) en las bisagras de los laterales que deslizan por las guías.
- Condiciones de simetría en los nodos correspondientes a la mitad de la pantalla

- Impedido el desplazamiento en el sentido de despliegue de la pantalla (eje Y) y en sentido radial de la cúpula (eje X) en el punto de enganche a la compuerta pequeña.
- Las bisagras de unión entre lamas se modelizan igualando desplazamientos en los nodos de unión entre lamas y dejando libres los giros.

Las fuerzas que se aplican:

- Peso propio (eje Y)
- Fuerza del viento de 45.6 Kg/m^2 , que se introduce como una fuerza de presión sobre los elementos lámina de la chapa.

La figura 6.9 representa el modelo de elementos finitos de la pantalla de protección antiviento.

6.3.2 Resultados del análisis

Se realizaron dos análisis no lineales para distintos estados de carga: sólo actuación del peso propio, y peso propio más viento de 45.6 Kg/m^2 desde el exterior excepto en las 5 primeras lamas que están protegidas por la compuerta. En las siguientes tablas, expresadas en unidades del sistema internacional (N,m), se recogen los resultados.

Tabla 6.9 Reacciones máximas en las ruedas

Tabla 6.10 Fuerzas máximas en las bisagras y coeficientes de seguridad en los pernos y en las soldaduras. Estos coeficientes de seguridad se establecen frente a un límite elástico del material $\sigma_y = 275 \text{ N/mm}^2$.

Tabla 6.11 Tabla de coeficientes de seguridad de tensiones en los marcos, en la chapa y en el perfil UPN. Estas tensiones se deben principalmente a flexión, los coeficientes de seguridad se establecen frente a un límite elástico del material $\sigma_y = 275 \text{ N/mm}^2$.

Tabla 6.12 Desplazamiento máximo de la pantalla antiviento

	Reacciones en ruedas (N)
Peso Propio	16733
Peso Propio y Viento	17400

Tabla 6.9

REACCIONES MÁXIMAS EN RUEDAS

	Cortante transversal (N/m)	Cortante longitudinal (N/m)	Coeficientes de seguridad	
			Pernos	Soldadura
Peso propio	< 100	11840	39	16
Peso propio y viento	< 100	25600	18	7

Tabla 6.10

FUERZAS MÁXIMAS Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD EN LAS BISAGRAS

	Peso Propio	Peso Propio y Viento
Marcos horizontales(50x 5)	11	3.93
Marcos horizontales (70x5)	1.38 *	1.34 *
	1.9	1.8
Marcos verticales(5x20)	3 *	2.92 *
	4.8	3.7
Marcos laterales(70x5) y Tirantes (100x10)	1.1 *	1.06 *
	2.4	2.31
Marcos diagonales (5x20)	3	2.92
Perfil UPN	2.5	2.47
Chapa de 2 mm	4.4	3.8
Chapa de 3 mm	5.6	5.6

Tabla 6.11

COEFICIENTES DE SEGURIDAD

- * Coeficientes de seguridad debidos a tensiones locales elevadas en la zona de unión al mecanismo de enganche a la compuerta pequeña. Junto a este valor se da el coeficiente de seguridad sin considerar estos picos locales.

	Desplazamiento (m)
Peso Propio	0.055
Peso Propio y Viento	0.056

Tabla 6.12
MÁXIMOS DESPLAZAMIENTOS

En los casos en los que los coeficientes de seguridad son menores, se debe a tensiones elevadas puntuales.

Para el caso de carga de peso propio más viento:

En la figura 6.10 se observan las tensiones que aparecen en los marcos horizontales.

En la figura 6.11 se observan las tensiones que aparecen en los marcos verticales.

Se considera que el comportamiento estático y dinámico global de la estructura desde el punto de vista de tensiones, desplazamientos, cargas en carretones adecuado y que cumple las características vigentes.

6.4 ESTUDIO DE LAS CONTRAVENTANAS DE LA CÚPULA Y DEL EDIFICIO BASE FRENTE A PESO PROPIO Y VIENTO

6.4.1 Modelo de la Contraventana

Se realiza únicamente un modelo de análisis de las contraventanas inferiores de la cúpula. Las tensiones y deformaciones que sufrirán las contraventanas del edificio base y las contraventanas superiores de la cúpula quedarán envueltas por las que se obtengan en el citado análisis; en el primer caso por ser de menores dimensiones (altura, anchura) y similar diseño (mismos perfiles); y en el segundo caso porque al estar inclinadas la carga de viento, que es la crítica para el diseño, es menor que en las contraventanas inferiores.

El modelo de elementos finitos desarrollado se presenta en las figuras 6.12 y 6.13. Está formado en su totalidad por elementos lámina de 4 nodos que representan la geometría y espesores de perfiles.

La masa del modelo calculada en base a la densidad del acero (7850 kg/m^3) es de 1498 kg. El volumen aproximado de aislante de relleno de la contraventana es de 2.12 m^3 . Tomando la densidad de una lama de vidrio pesada $\zeta = 96 \text{ kg/m}^3$ se obtiene una masa de aislante de $\cong 203 \text{ kg}$.

Para considerar dicha masa no estructural en el modelo de elementos finitos se introduce una densidad ficticia para las chapas de 8916 kg/m^3 , lo que produce una masa total de la contraventana de 1701 kg.

Se establecen dos casos de carga:

- Viento = 6000 N/m^2 , que se introduce en forma de presión perpendicular a cada uno de los elementos de la chapa exterior de la contraventana.
- Peso propio, que se introduce como una aceleración vertical $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Como condiciones de contorno para ambos casos de carga se impiden los desplazamientos transversales en la contraventana en los nodos que representan los apoyos superiores e inferiores de la misma y los desplazamientos verticales sólo en los apoyos inferiores.

En las figuras 6.14 a 6.17 se muestran los desplazamientos (m) y tensiones de von Mises (N/m^2) para cada caso.

6.4.2 Conclusiones

La tabla siguiente muestra los valores máximos obtenidos en el modelo de la contraventana inferior.

	VIENTO	PESO PROPIO
DESPLAZAMIENTO (mm)	6.5	0.3
TENSIÓN (kg/cm^2)	1390	104

El máximo desplazamiento se considera aceptable pues no altera la funcionalidad de la contraventana.

La máxima tensión está suficientemente alejada del límite elástico del acero.

6.5 TOPES EN VIGAS EN ARCO PARA AMORTIGUADORES DE LAS COMPUERTAS

Un análisis detallado de estos topes se realiza en el apartado B.8.

La descripción geométrica de estos topes se da en el plano DP 17.

La estructura soporte del tope consiste en un cajón cerrado, soldado en la parte inferior de las vigas de arco en uno de sus laterales y en su parte posterior este cajón se suelda al anillo base de la cúpula.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 81 de 145
---	--	---

El cajón está formado por una placa superior y otra inferior de 25 mm y placas laterales de 10 mm.

En el extremo del cajón se suelda un perfil HEB-200 y 400 mm de longitud, que será el que soporta directamente el impacto de los amortiguadores de las compuertas.

Para analizar este soporte, se realiza un modelo de elementos finitos local que incluye:

- Un sector de viga de arco
- Un sector de anillo base de la cúpula
- Cajón soporte (Tope de los amortiguadores de las compuertas)
- No se ha modelizado la rigidización aportada por la chapa del cerramiento exterior de la cúpula.

En el punto de impacto de la carga del amortiguador en el soporte, se ha aplicado una carga $P = 1.5 \times 66000$ kg.

Esta carga de 66000 kg se toma del DP 30.

En la figura A.6.18 se da un detalle de la geometría del M.E.F. local del soporte de los amortiguadores.

En la figura A.6.19 se da el estado máximo de tensiones obtenidas en dicho soporte.

Los estados máximos de tensiones obtenidas son:

- Placas superior e inferior de 25 mm 2610 kg/cm^2
- Placas laterales de 10 mm 2640 kg/cm^2
- Perfil HEB200 2720 kg/cm^2

Estos estados de tensiones máximas son locales e inferiores a los admisibles.

6.6 ANCLAJE DE LOS AMORTIGUADORES A LA CÚPULA

Un estudio detallado de la estructura de anclaje de los amortiguadores en las compuertas de observación se realiza en el apartado B.9.

La descripción geométrica de la estructura de anclaje de los amortiguadores a las compuertas de observación se da en el plano DP 24.

La estructura de anclaje está formada por una rigidización local de las compuertas de observación en la zona de anclaje de los amortiguadores.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 82 de 145
---	--	---

Esta rigidización se realiza en cada uno de los extremos de las compuertas, basada en un cajón cuadrado con dos placas laterales de 20 mm una placa inferior de 15 mm y la placa superior estaría formada por el propio cerramiento de la compuerta de 5 mm. En la zona frontal del cajón se ancla el amortiguador en una placa de espesor 40 mm.

Además se rigidiza el cajón con dos perfiles LPN 100 x 10 y un LPN 80 x 8.

La longitud del cajón de rigidización es la existente entre dos cerchas de la estructura de la compuerta.

Para analizar esta estructura de anclaje de los amortiguadores se realiza un modelo local de elementos finitos local, en donde se modeliza:

- Placas laterales de 20 mm del cajón de refuerzo
- Placa inferior de 15 mm del cajón de refuerzo
- Perfiles LPN
- Placa frontal de 40 mm
- Un sector del cerramiento de cubierta de las compuertas de observación (placa de 5 mm)

La carga máxima de 66000 Kg (DP 30) dada por los amortiguadores se introduce como una presión equivalente en la placa frontal de 40 mm y en un área equivalente al área de apoyo del amortiguador.

El modelo local del cajón de rigidización de la compuerta de observación se da en las figuras A.6.20 y A.6.21.

Los estados de tensiones máximos obtenidos en las distintas zonas del cajón son:

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| • Placas de 20 mm | 1070 kg/cm ² |
| • Placa inferior de 15 mm | 1186 kg/cm ² |
| • Placa frontal de 40 mm | 1122 kg/cm ² |
| • Perfiles LPN | 1438 kg/cm ² |
| • Placas del techo | 1245 kg/cm ² |

Estos estados de tensiones son inferiores a las admisibles.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 83 de 145
---	--	---

6.7 SOPORTADO DE LAS CADENAS EN LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

Un estudio detallado de la estructura de anclaje de las cadenas a las compuertas de observación se realiza en el apartado B.10.

La descripción geométrica de la estructura de anclaje de las cadenas a dos compuertas de observación se da en el DP 24.

La estructura de anclaje está formada por un refuerzo del faldón de protección de las cadenas en el extremo de la compuerta donde se enganchan las cadenas. Este faldón se sustituye la chapa de cubierta de 5 mm por una placa de 20 mm.

Además de esta placa de 20 mm se cierra en su parte inferior con un cajón de chapa de 25 mm en cuyo extremo se sitúa la pieza de enganche de sujeción de las cadenas.

Para analizar esta estructura de anclaje de las cadenas se realiza un modelo local de elementos finitos en donde se modeliza:

- Se simula un sector de compuerta que incluye la zona de anclaje de cadenas más una zona alrededor de ésta, para simular correctamente las condiciones de contorno.
- En la zona de anclaje de cadenas se ha modelizado el conjunto del cajón de enganche de cadenas y la zona de faldón de las compuertas reforzado con chapa de 20 mm.

La carga máxima a la que se somete esta pieza de enganche se corresponde con el peso máximo de la compuerta de 90°, multiplicado por un coeficiente de seguridad de 1.5, $F = 40 \times 1.5 \text{ Tn}$.

El modelo de elementos finitos local se muestra en las figuras A.6.22.

Los estados de tensiones máximos obtenidos en cada una de las zonas analizadas es:

- Chapa de 20 mm del faldón de compuertas 2130 kg/cm²
- Cajón de chapa de 25 mm 2460 kg/cm²

Estos estados de tensiones son inferiores a los máximos admisibles

6.8 SOPORTADO DE MOTORREDUCTORES DE LAS COMPUERTAS DE OBSERVACIÓN

Un estudio detallado de la estructura de soportado de los motorreductores de las compuertas de observación se realiza en el apartado B.11.

La descripción geométrica de la estructura de soportado de los motorreductores de las compuertas de observación se da en el plano DP 14 y DP 17.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 84 de 145
---	--	---

La estructura soporte está formada por un chasis fabricado con una placa de 20 mm de espesor y $1.5 \times 0.75 \text{ m}^2$ de superficie soldada a la viga de arco. La placa soporte está rigidizada en su parte inferior por 4 perfiles HEB 160 y 3 perfiles cuadrados de 140 x 8 mm.

Los perfiles HEB 160 sirven a su vez de soporte de los motores de las cadenas.

Los tres perfiles cuadrados de 140 x 8 se rigidizan a su vez soldándolos en chapa de 15 mm.

Para analizar la estructura del soporte de los motorreductores se realiza un modelo local de elementos finitos en donde se modeliza:

- Un sector de la viga de arco donde se instala el soporte del motorreductor
- Chasis formado por chapa $t = 20 \text{ mm}$
- Perfiles HEB 160
- Perfiles cuadrados 140 x 8
- Chapa de rigidización de 15 mm

Los motores y reductores se han simulado con barras de alta rigidez desde el punto de actuación de las fuerzas que producen a sus puntos de anclaje.

Se han analizado dos modelos de soporte de motorreductores: un soporte superior a 90° en la viga de arco y otro inferior a 27° . La diferencia entre los dos modelos está en que los puntos de actuación de fuerzas en reductores y motores están más alejados de la viga de arco en el modelo de 27° y por lo tanto representa un estado de cargas más crítico.

En la figura A.6.23 se representa el modelo de elementos finitos generado para el análisis de dicho soporte.

En la figura A.6.24 se representa las cargas y masas introducidas por los reductores y motores. Estas cargas están multiplicadas por un factor de seguridad de 1.5.

En la figura A.6.25 se representan los estados de tensiones obtenidas en el soporte.

Los estados de tensiones obtenidas son inferiores a las admisibles.

6.9 SOPORTES DE CADENAS A LA VIGA DE ARCO

Un estudio detallado de la estructura de los soportes de las cadenas en las vigas de arco se realiza en el apartado B.11.

La descripción geométrica de la estructura de soportado de las cadenas de las compuertas en las vigas de arco se da en el plano DP 11.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 85 de 145
---	--	---

La estructura soporte de las cadenas está formada por un chasis fabricado con una placa de 20 mm y 0.7 x 0.5 m² de superficie, soldada a la vida de arco. Esta placa soporte está rigidizada en su parte inferior por un perfil cuadrado 100 x 5.

Para analizar esta estructura soporte de las cadenas se realiza un modelo de elementos finitos local en donde se modeliza.

- Un sector de la viga de arco donde se instala el soporte de cadenas
- Chasis formado por chapa t = 20 mm
- Perfil cuadrado de refuerzo

Las poleas del soporte de cadenas a la viga de arco se simulan con barras de alta rigidez desde el punto de aplicación de la fuerza de cadenas, hasta los puntos de anclaje de las poleas.

En la figura A.6.26 se representa el modelo de elementos finitos realizado, así como la carga máxima considerada producida por las cadenas de las compuertas de observación. Esta carga está multiplicada por un coeficiente de seguridad de 1.5.

En la figura A.6.27 se representa el estado de tensiones obtenido en el soporte de cadenas. Los estados de tensiones obtenidos son inferiores a los admisibles.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 86 de 145
---	--	---

7. CONCLUSIONES

Los análisis realizados y los resultados obtenidos confirman la integridad estructural de la cúpula del GTC frente a los casos de carga estipulados en la normativa aplicable y en el documento A1.

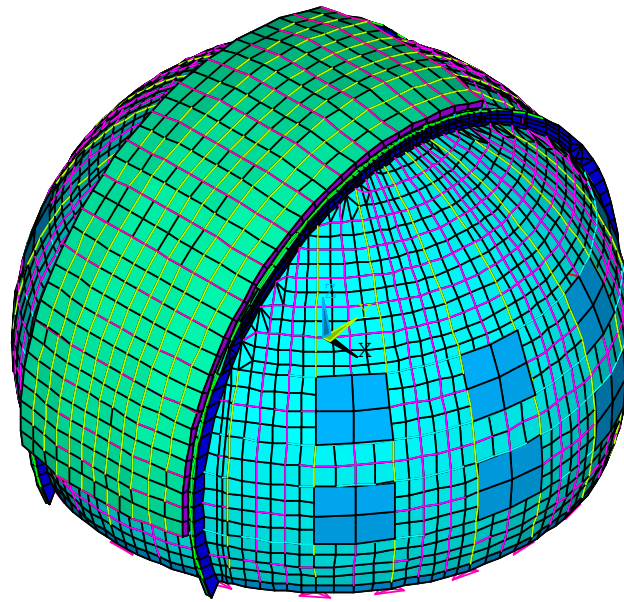
Las máximas reacciones en los carretes de apoyo de la cúpula y de las compuertas de observación han sido transmitidas a los diseñadores de los mismos para verificar su integridad.

Tanto en las instalaciones del fabricante como en el ORM, a la hora del montaje de la cúpula, se tendrá especial cuidado en desarrollar un procedimiento de montaje que asegure la integridad del conjunto frente a las cargas actuantes en cada momento.

 IberEspacio Tecnología Aeroespacial	ANÁLISIS ESTRUCTURAL CÚPULA GTC	Código: EXT/GMU/0232-R Edición: 2A Fecha: 08-05-02 Página: 87 de 145
---	--	---

ANEXO DE FIGURAS

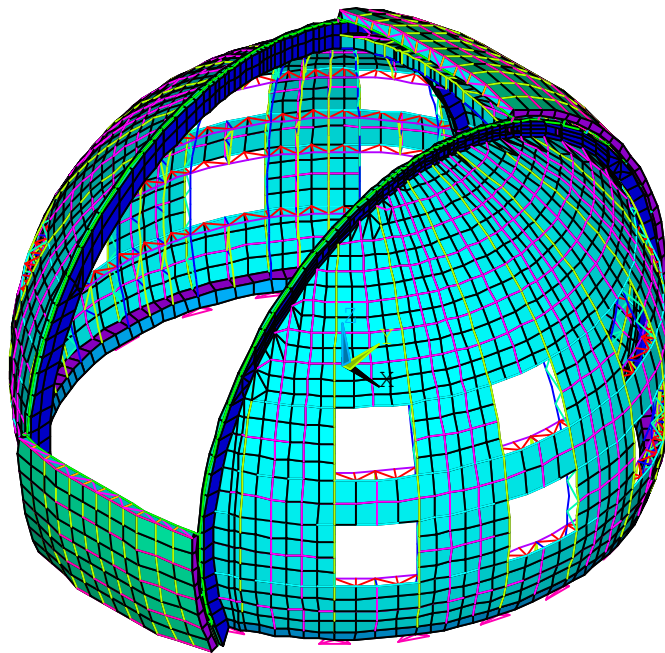
1



MODELO GLOBAL CON COMPUERTAS CERRADAS

Figura 3.1

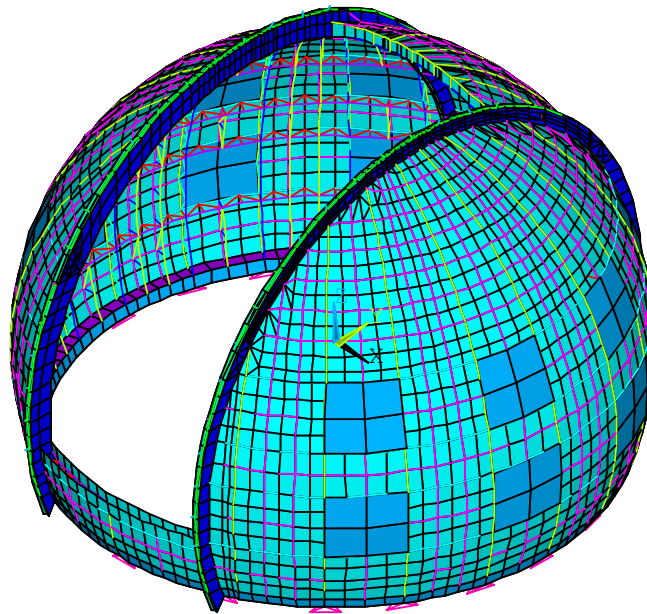
1



MODELO GLOBAL CON COMPUERTAS ABIERTAS

Figura 3.2

1



MODELO GLOBAL SIN COMPUERTAS

Figura 3.3

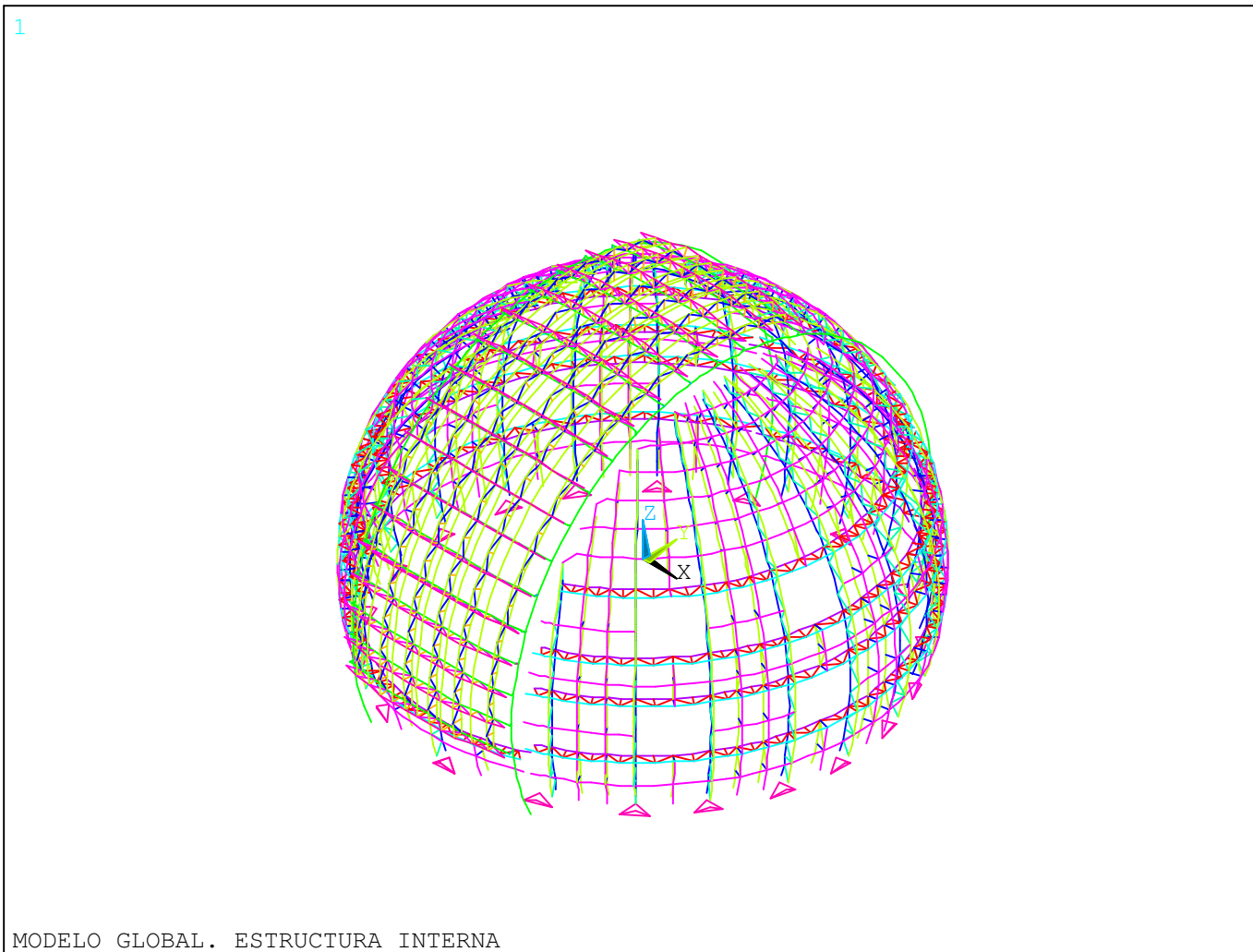
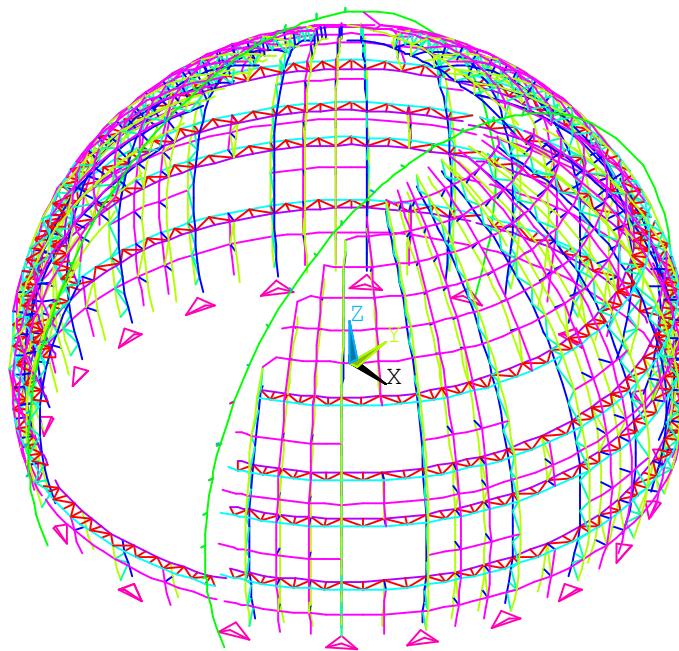


Figura 3.4

1



MODELO GLOBAL SIN COMPUERTA. ESTRUCTURA INTERNA

Figura 3.5

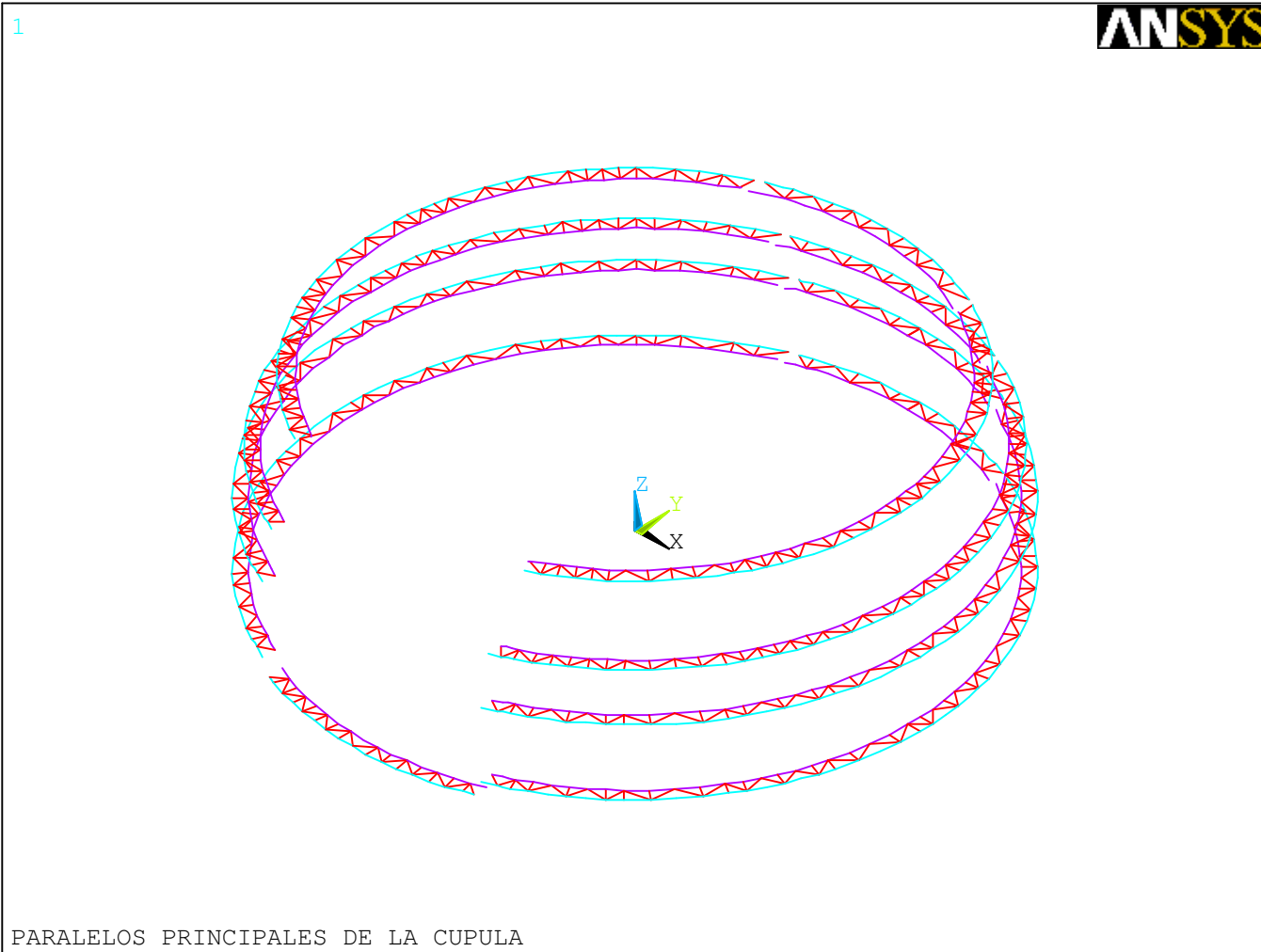


Figura 3.6

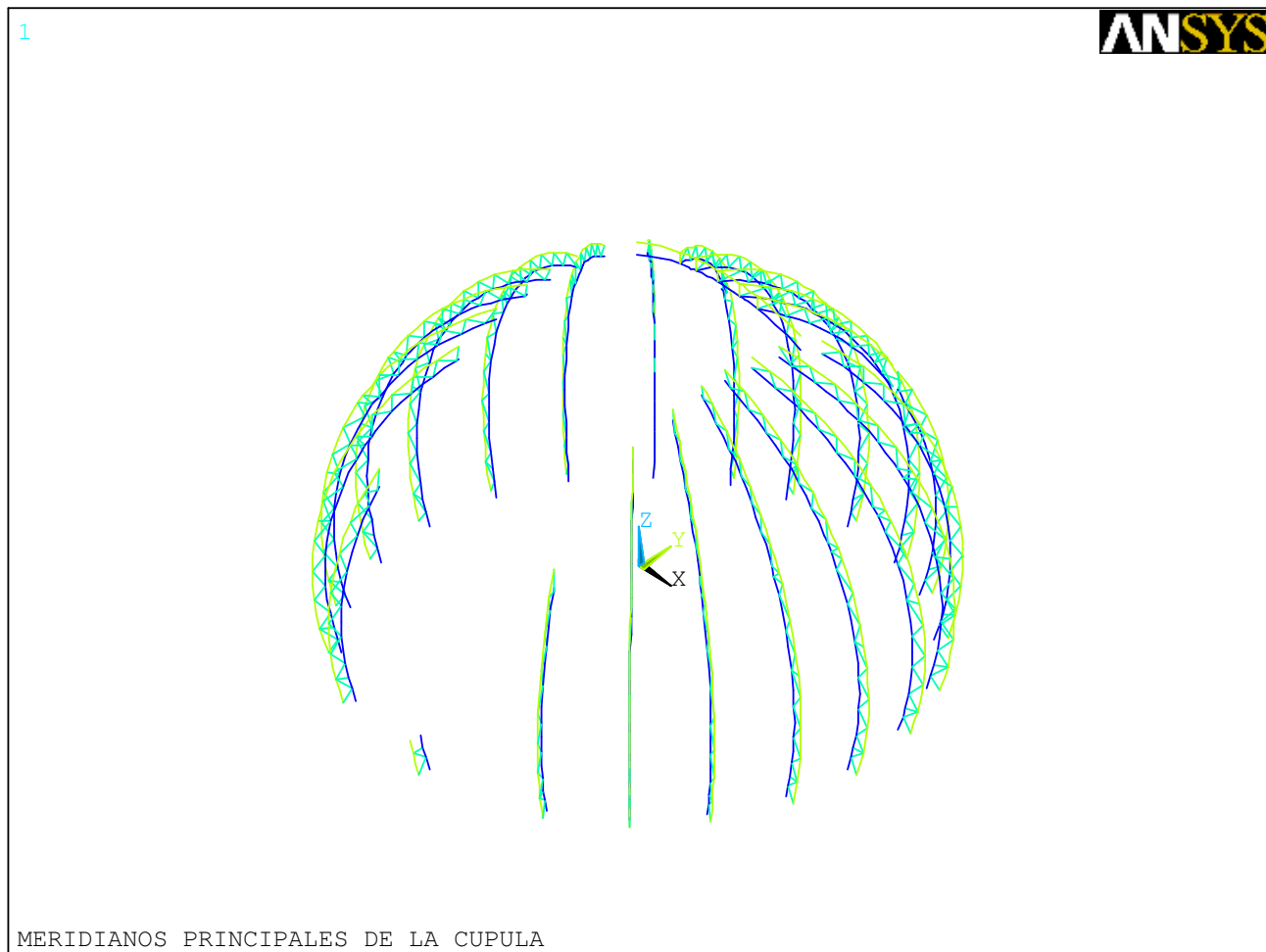


Figura 3.7

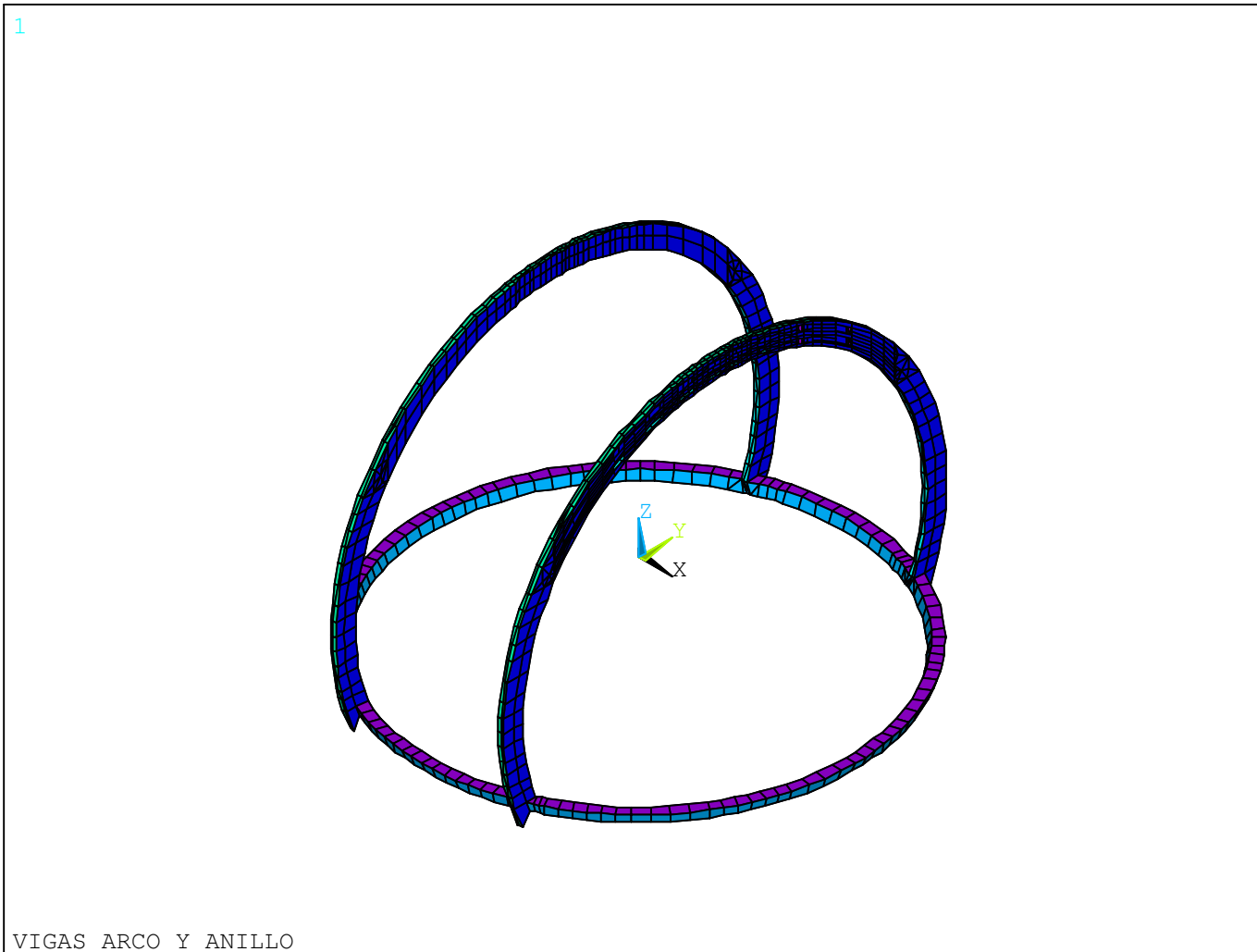


Figura 3.8

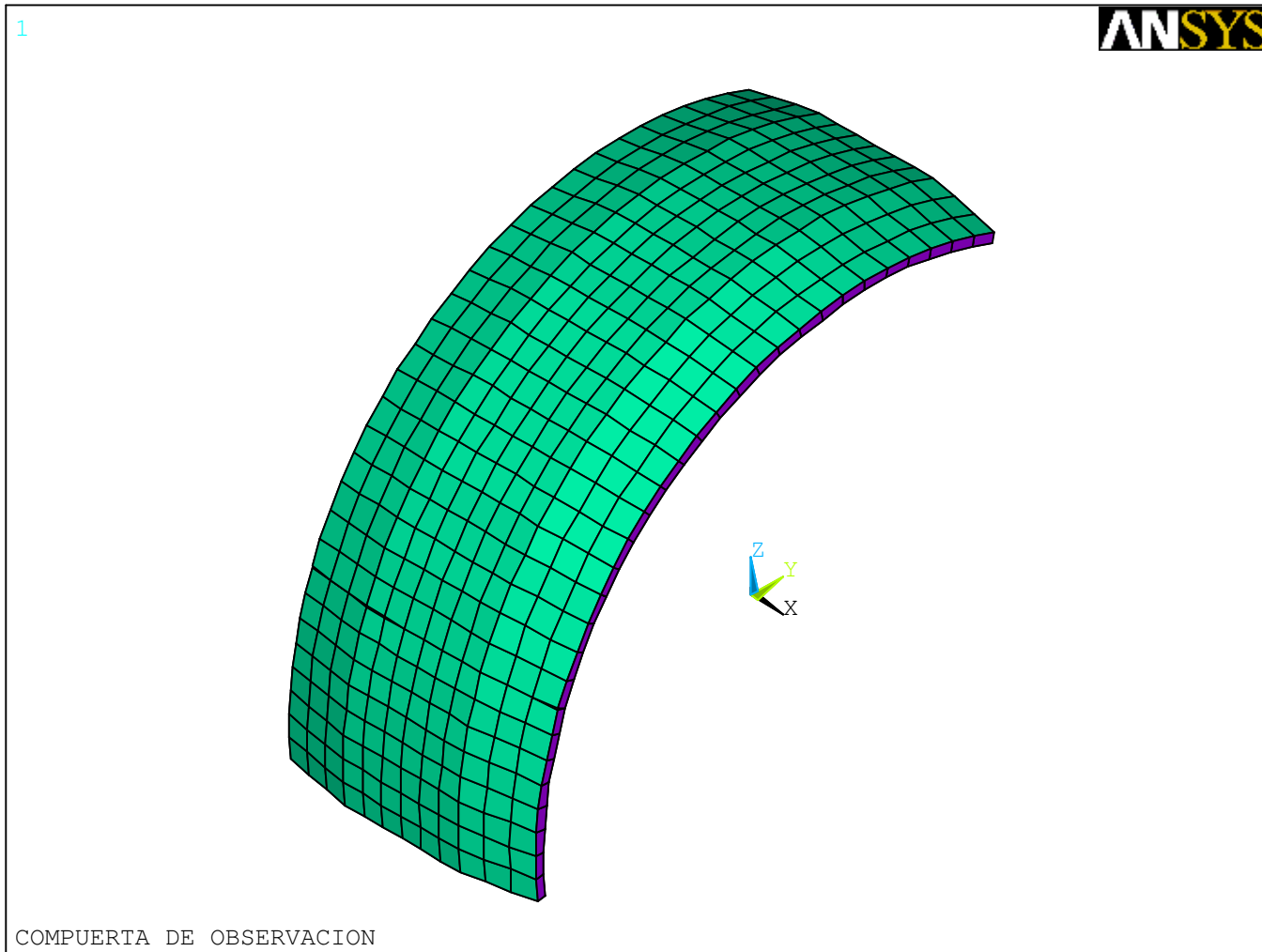


Figura 3.9

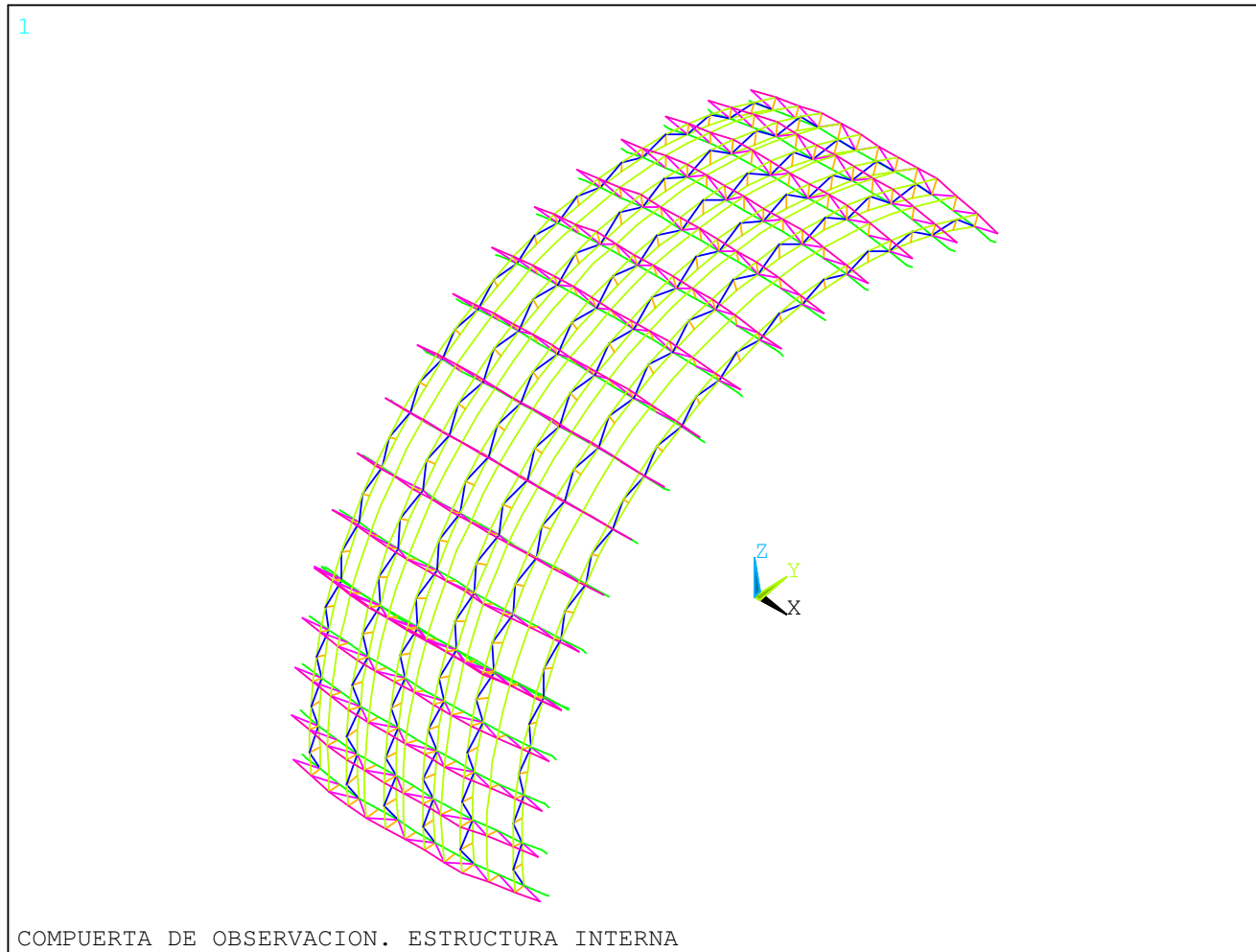


Figura 3.10

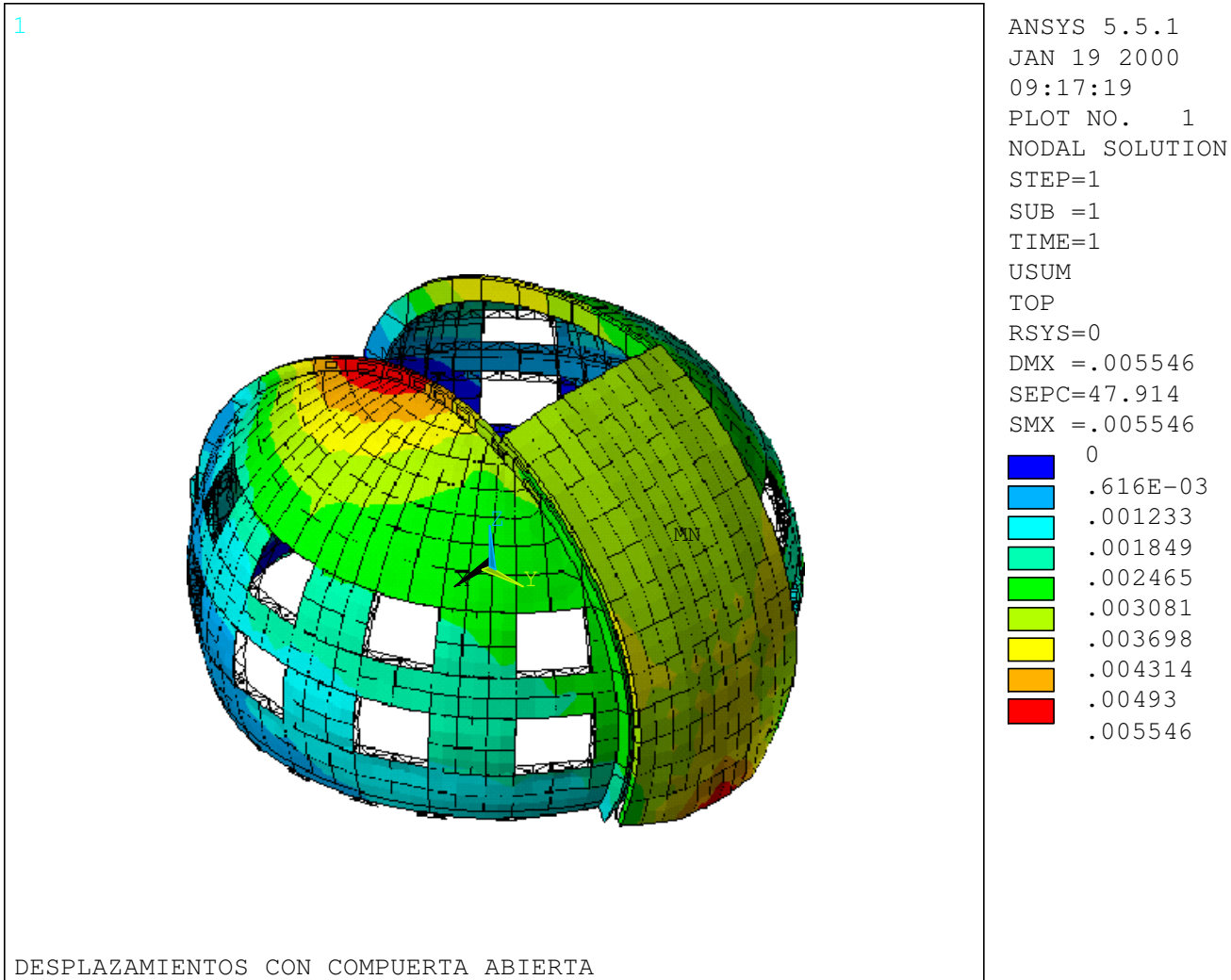
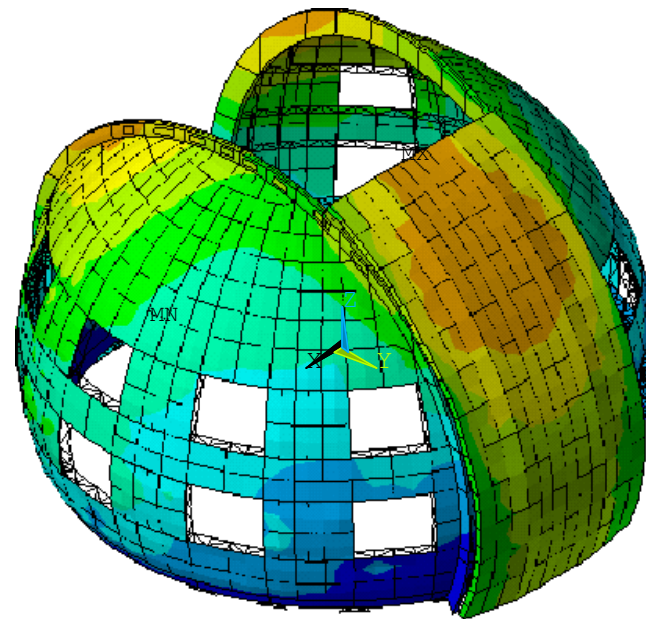


Figura 4.1

1



ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:21:34
PLOT NO. 31
NODAL SOLUTION
STEP=2
SUB =1
TIME=2
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.005805
SEPC=46.865
SMX =.005805
0
.645E-03
.00129
.001935
.00258
.003225
.00387
.004515
.00516
.005805

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA ABIERTA

Figura 4.2

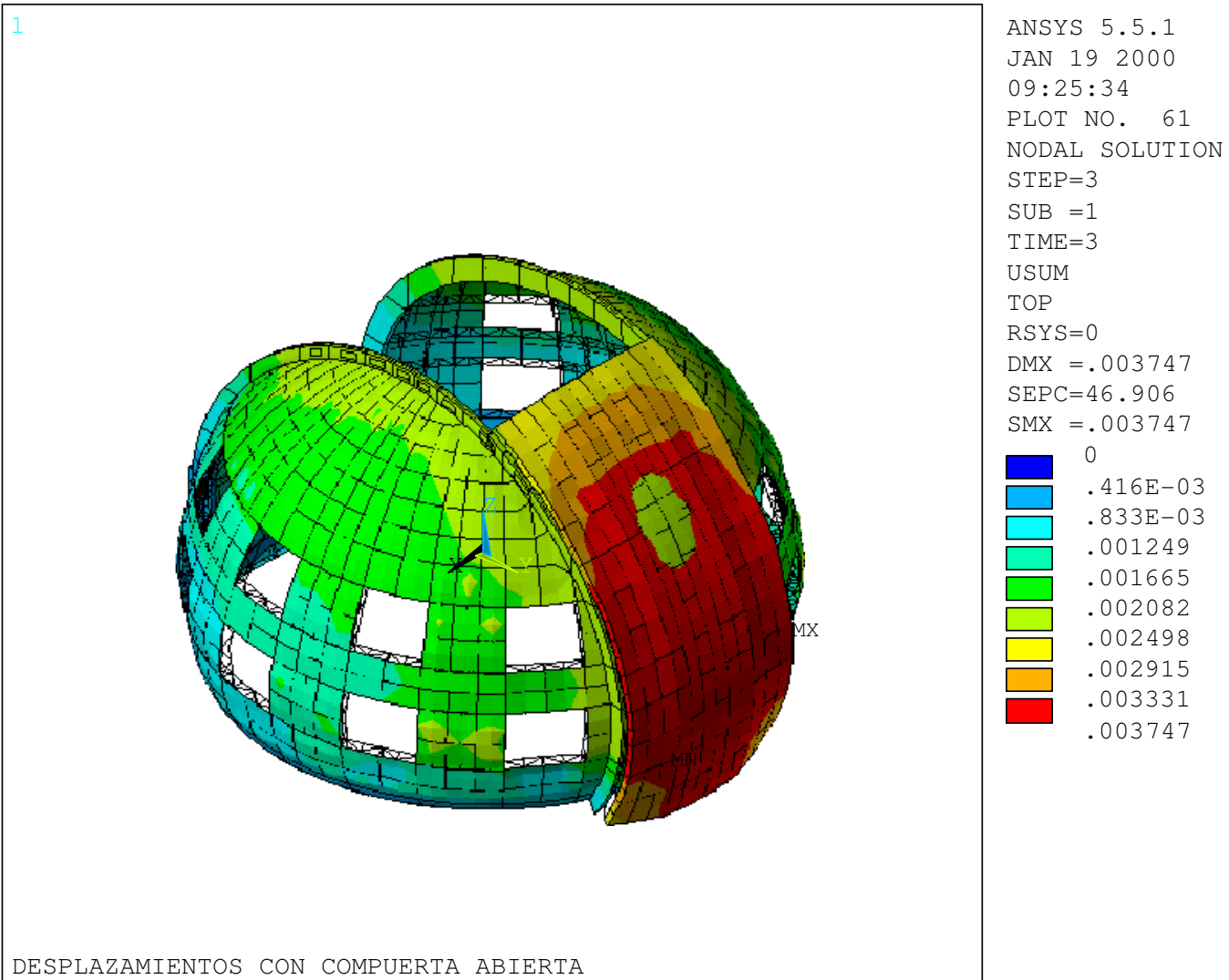
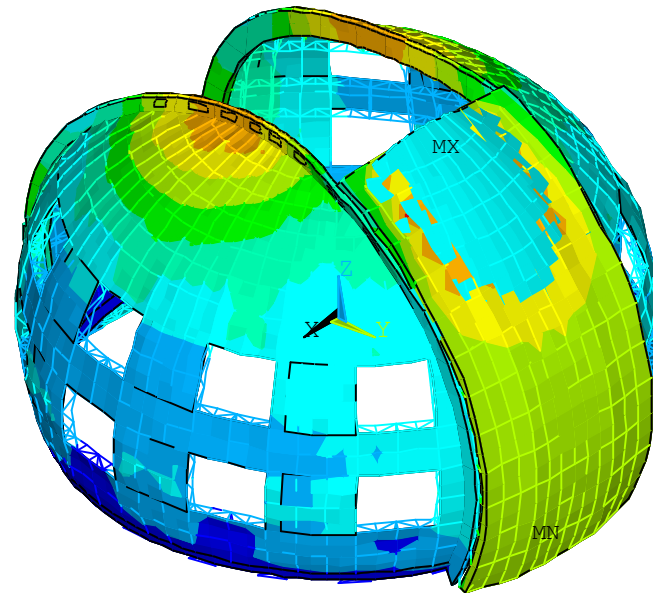


Figura 4.3

1

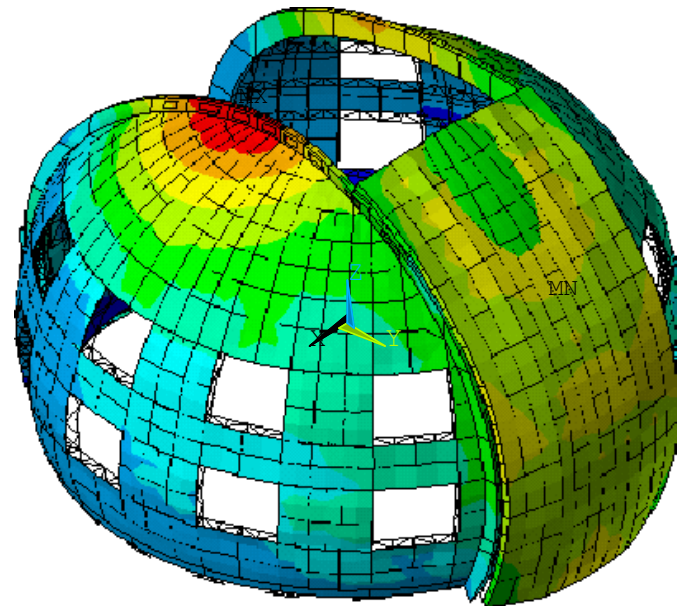


1.33*(PP) + 1.5*(NIEVE)

ANSYS 5.5.1
MAR 20 2000
16:51:26
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.006773
SMX =.006773
0
.753E-03
.001505
.002258
.00301
.003763
.004515
.005268
.00602
.006773

Figura 4.4

1

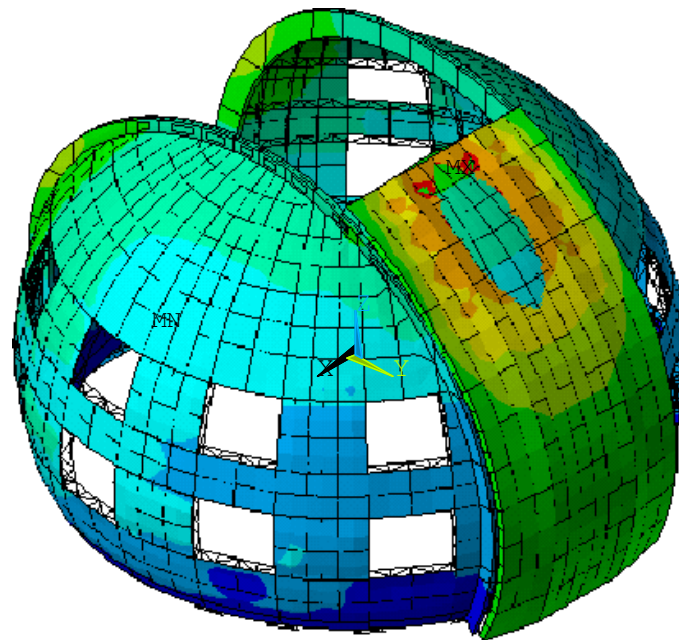


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:34:00
PLOT NO. 121
NODAL SOLUTION
STEP=5
SUB =1
TIME=5
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.008322
SEPC=46.495
SMX =.008322
0
.925E-03
.001849
.002774
.003698
.004623
.005548
.006472
.007397
.008322

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA ABIERTA

Figura 4.5

1

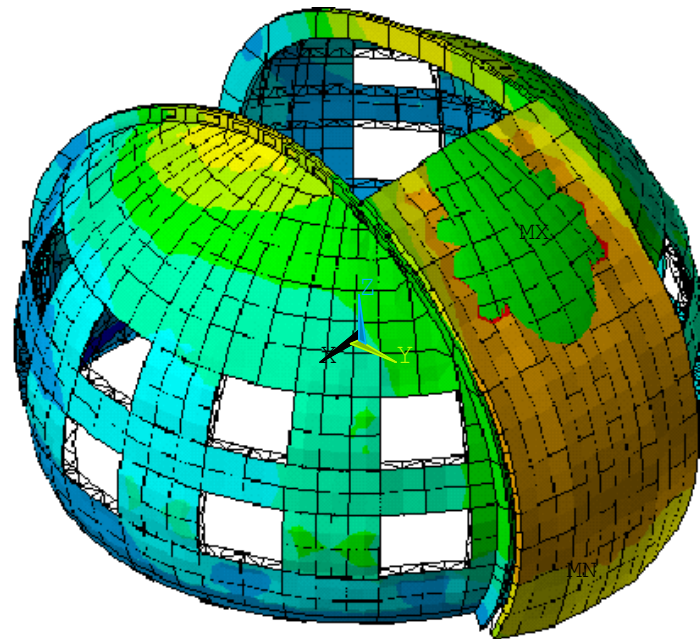


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:38:53
PLOT NO. 151
NODAL SOLUTION
STEP=6
SUB =1
TIME=6
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.009369
SEPC=46.353
SMX =.009369
0
.001041
.002082
.003123
.004164
.005205
.006246
.007287
.008328
.009369

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA ABIERTA

Figura 4.6

1

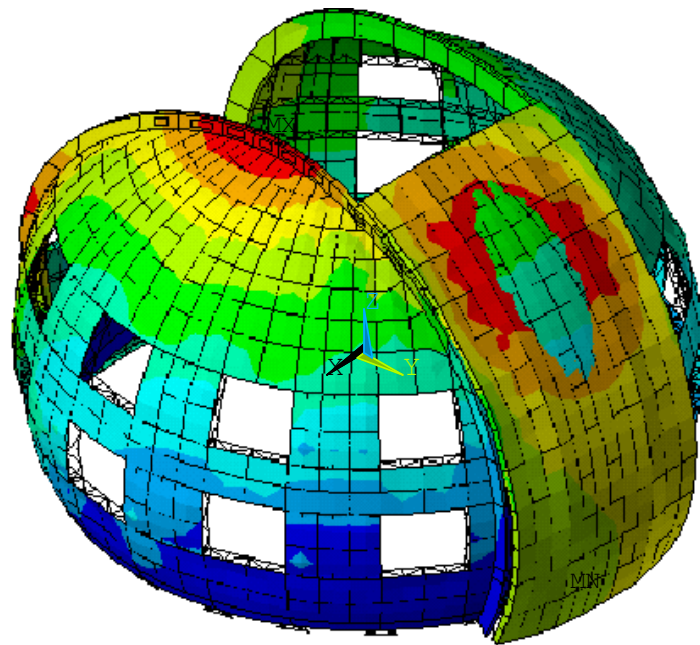


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:42:55
PLOT NO. 181
NODAL SOLUTION
STEP=7
SUB =1
TIME=7
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.006641
SEPC=45.836
SMX =.006641
0
.738E-03
.001476
.002214
.002951
.003689
.004427
.005165
.005903
.006641

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA ABIERTA

Figura a4.7

1

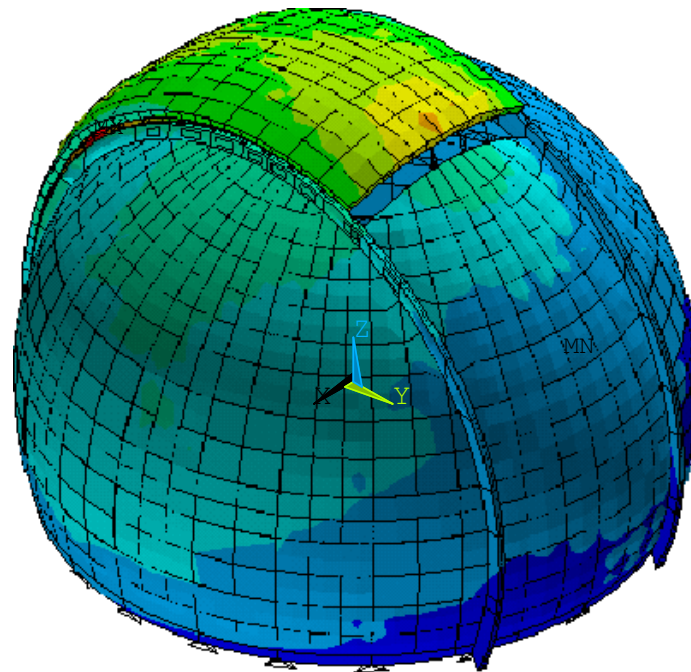


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:46:52
PLOT NO. 211
NODAL SOLUTION
STEP=8
SUB =1
TIME=8
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.003806
SEPC=46.529
SMX =.003806
0
.423E-03
.846E-03
.001269
.001692
.002115
.002537
.00296
.003383
.003806

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA ABIERTA

Figura 4.8

1

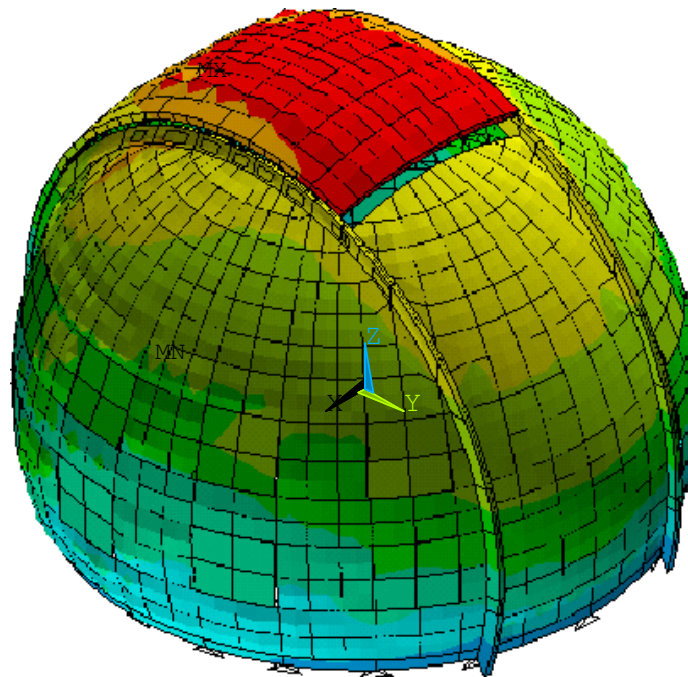


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
08:26:05
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.020447
SEPC=42.213
SMX =.020447
0
.002272
.004544
.006816
.009087
.011359
.013631
.015903
.018175
.020447

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA CERRADA

Figura 4.9

1



ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
08:30:12
PLOT NO. 31
NODAL SOLUTION
STEP=2
SUB =1
TIME=2
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.012888
SEPC=49.267
SMX =.012888
0
.001432
.002864
.004296
.005728
.00716
.008592
.010024
.011456
.012888

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA CERRADA

Figura 4.10

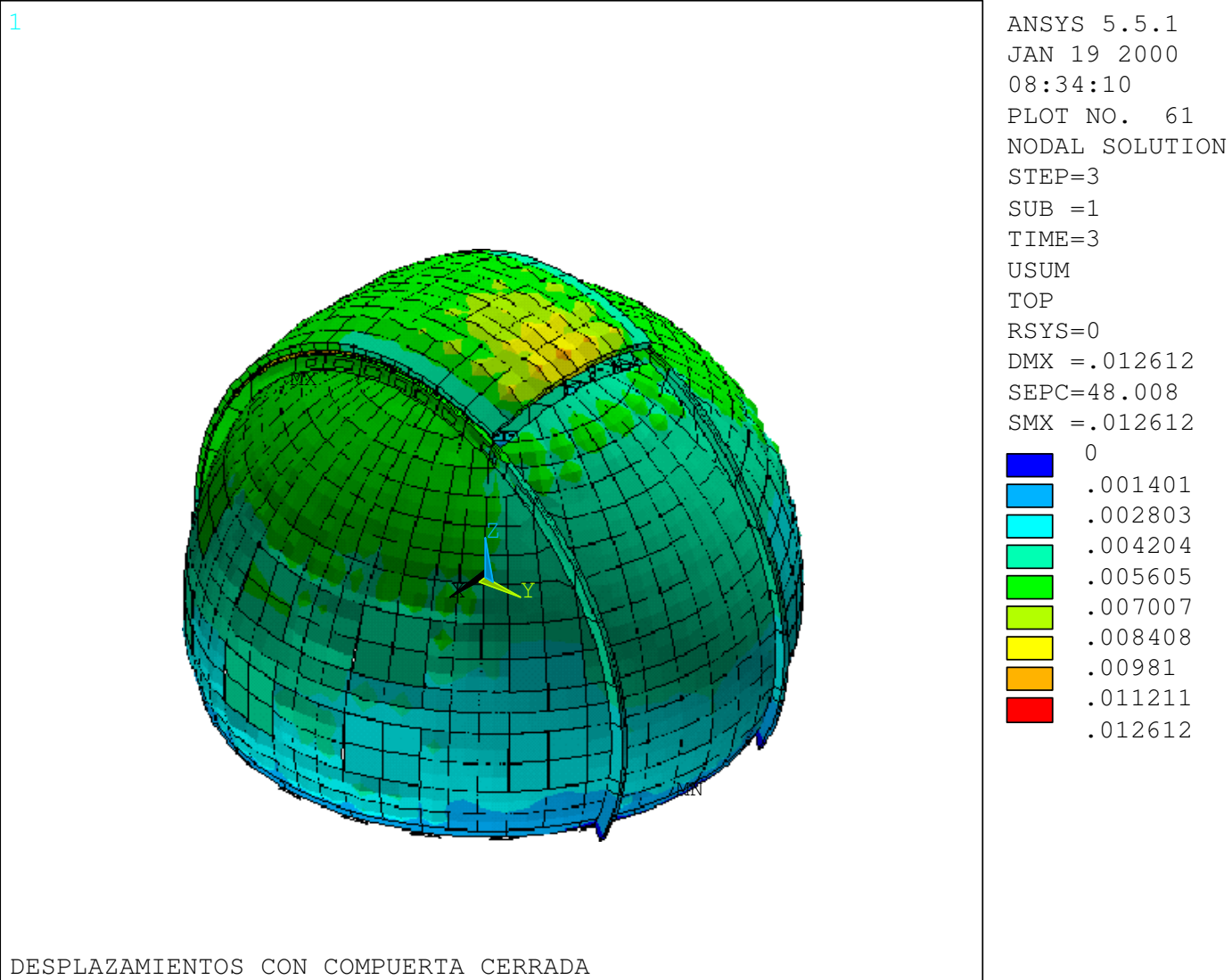
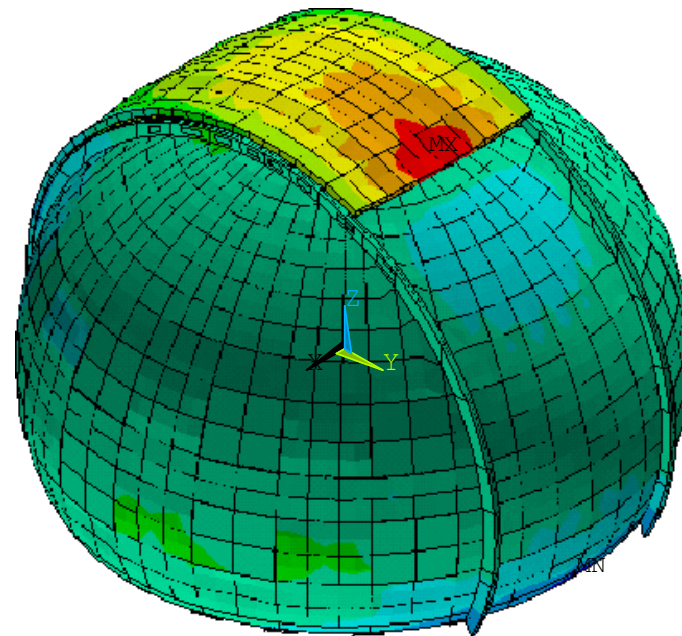


Figura 4.11

1



ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
08:38:04
PLOT NO. 91
NODAL SOLUTION
STEP=4
SUB =1
TIME=4
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.014441
SEPC=51.054
SMN =.002484
SMX =.014441

Blue	.002484
Light Blue	.003813
Cyan	.005141
Green	.00647
Yellow-Green	.007798
Yellow	.009127
Orange	.010455
Red-Orange	.011784
Red	.013112
Dark Red	.014441

Figura 4.12

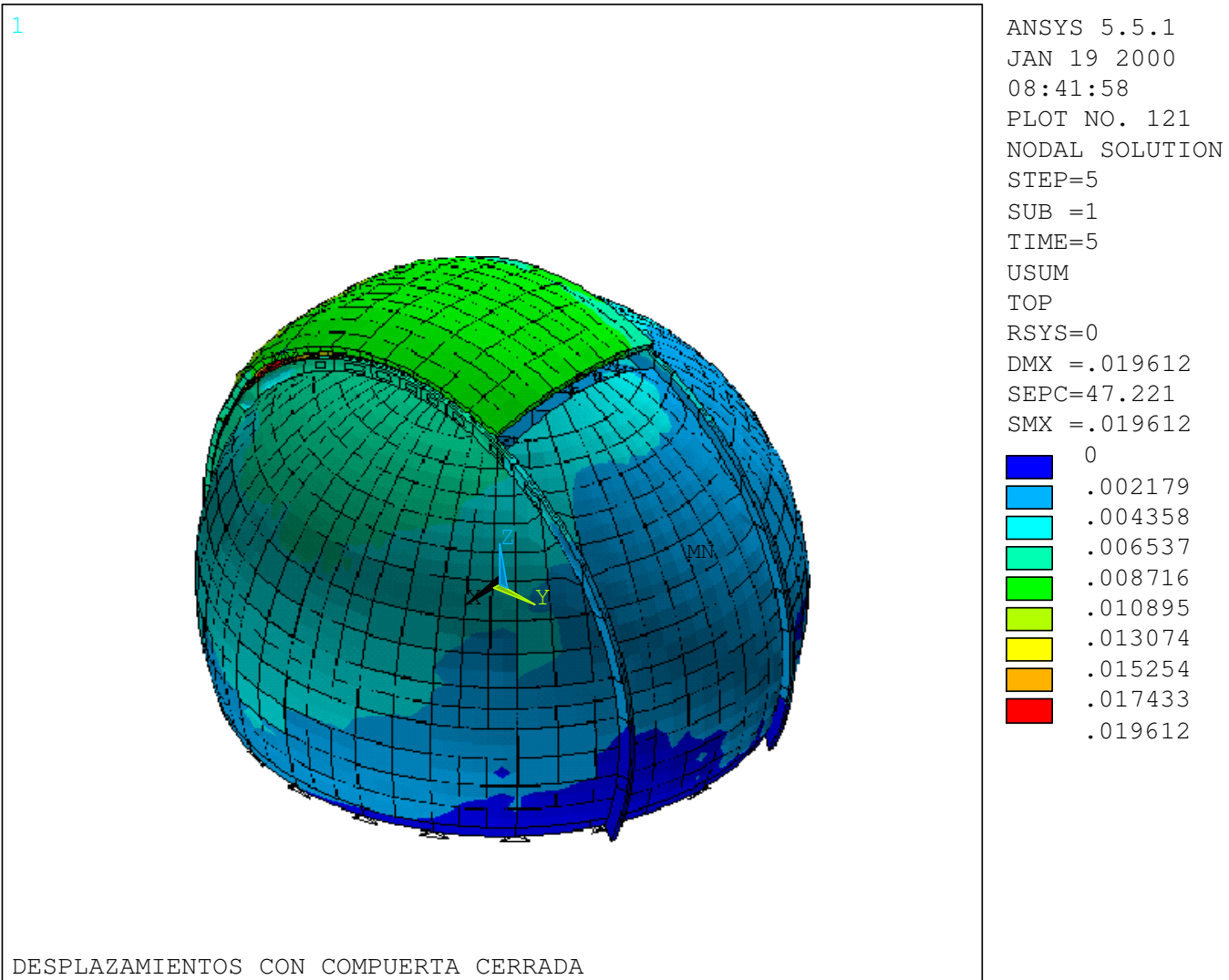


Figura 4.13

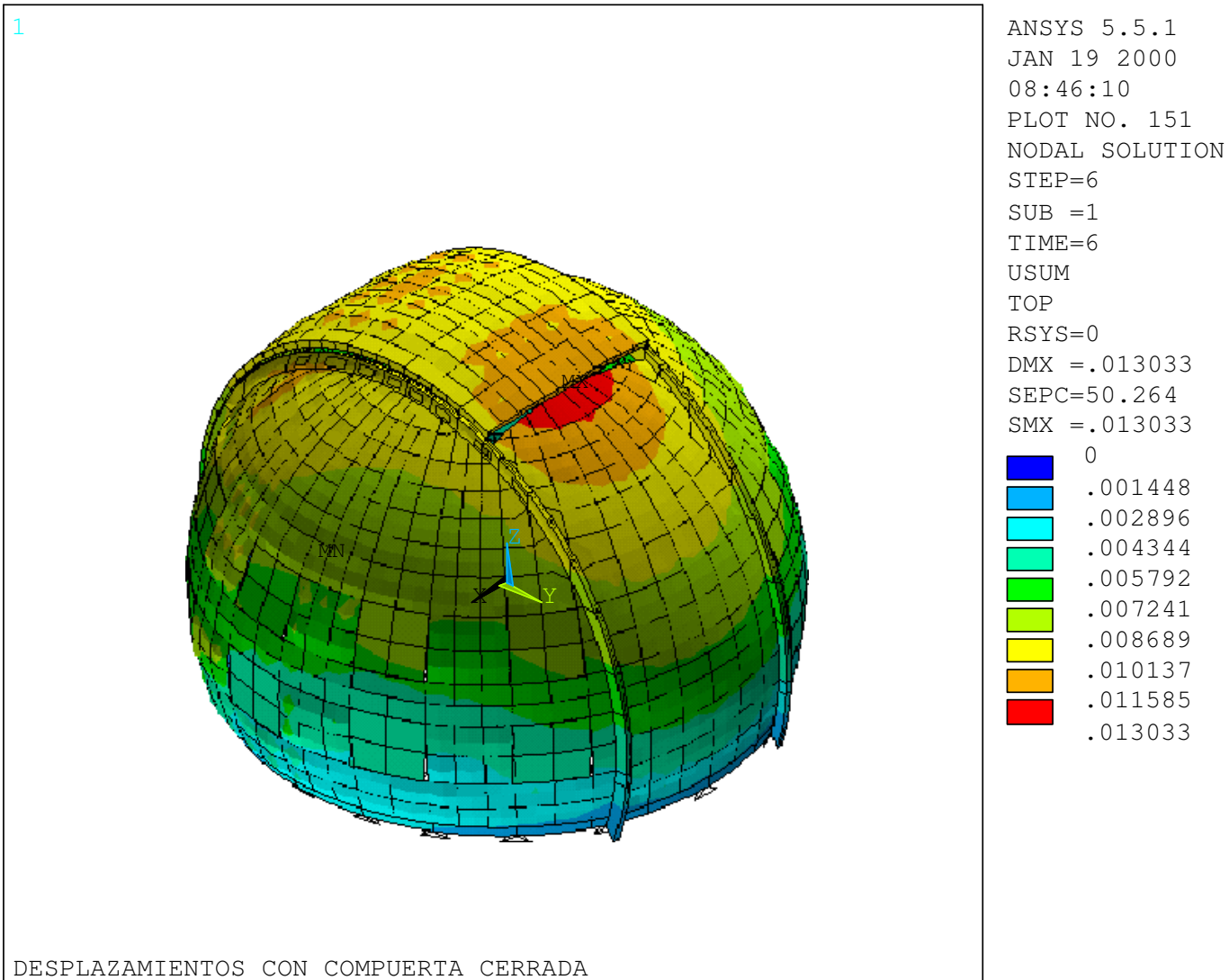


Figura 4.14

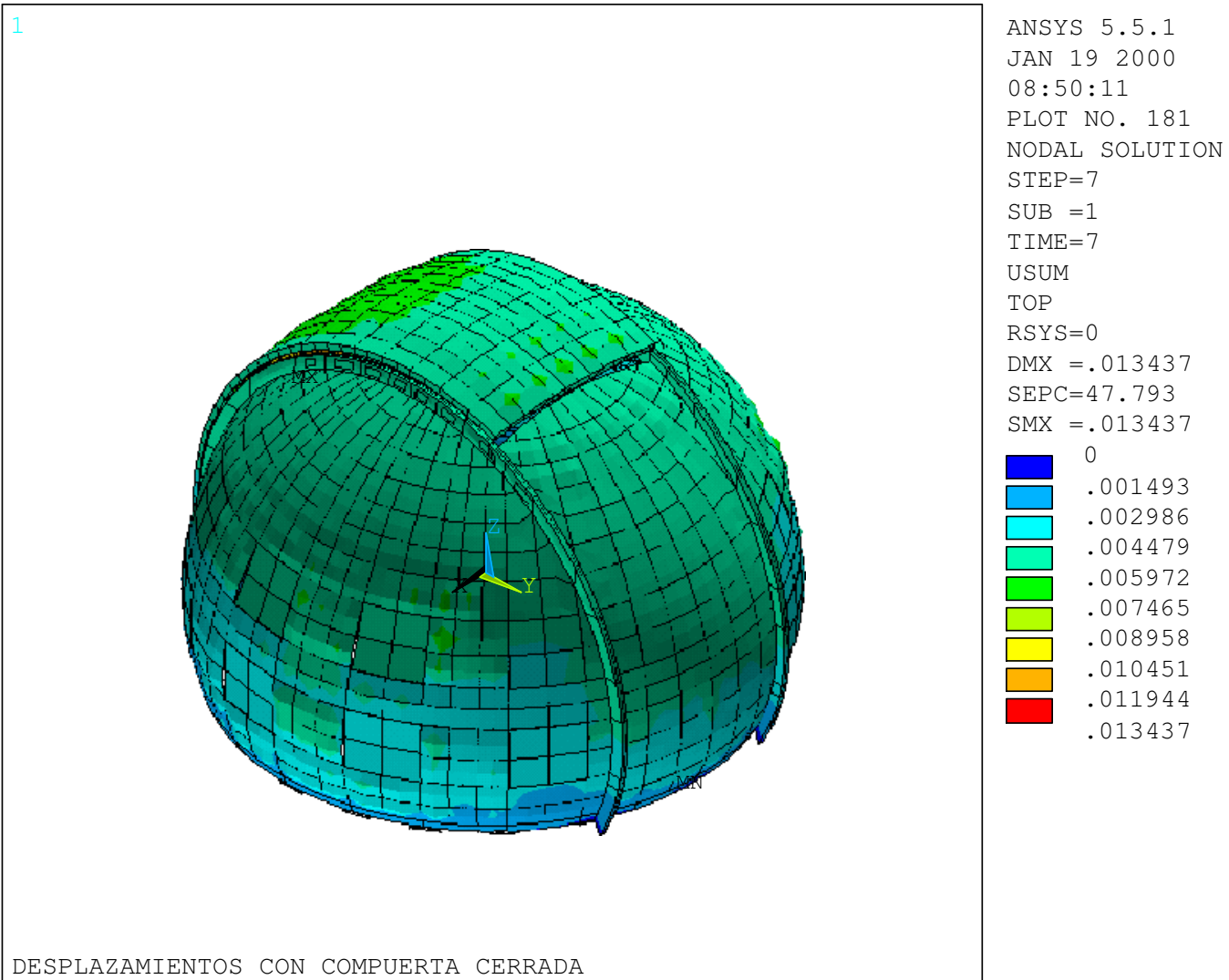
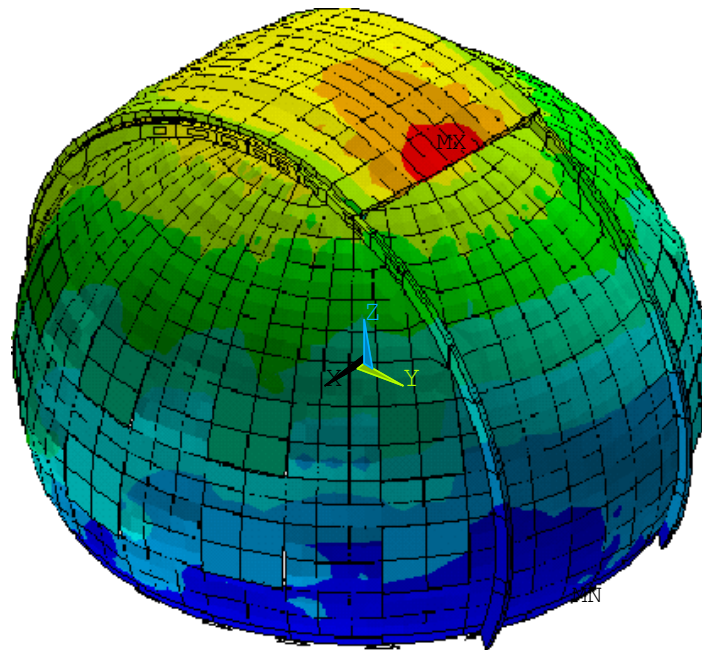


Figura 4.15

1

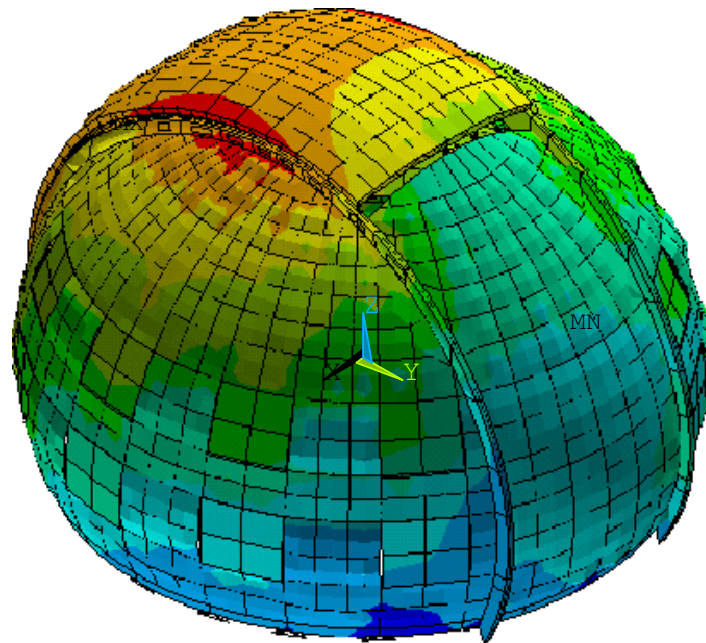


ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
08:54:14
PLOT NO. 211
NODAL SOLUTION
STEP=8
SUB =1
TIME=8
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.003268
SEPC=53.217
SMX =.003268
0
.363E-03
.726E-03
.001089
.001453
.001816
.002179
.002542
.002905
.003268

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA CERRADA

Figura 4.16

1



ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
08:58:16
PLOT NO. 241
NODAL SOLUTION
STEP=9
SUB =1
TIME=9
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.00258
SEPC=55.541
SMX =.00258
0
.287E-03
.573E-03
.860E-03
.001147
.001434
.00172
.002007
.002294
.00258

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA CERRADA

Figura 4.17

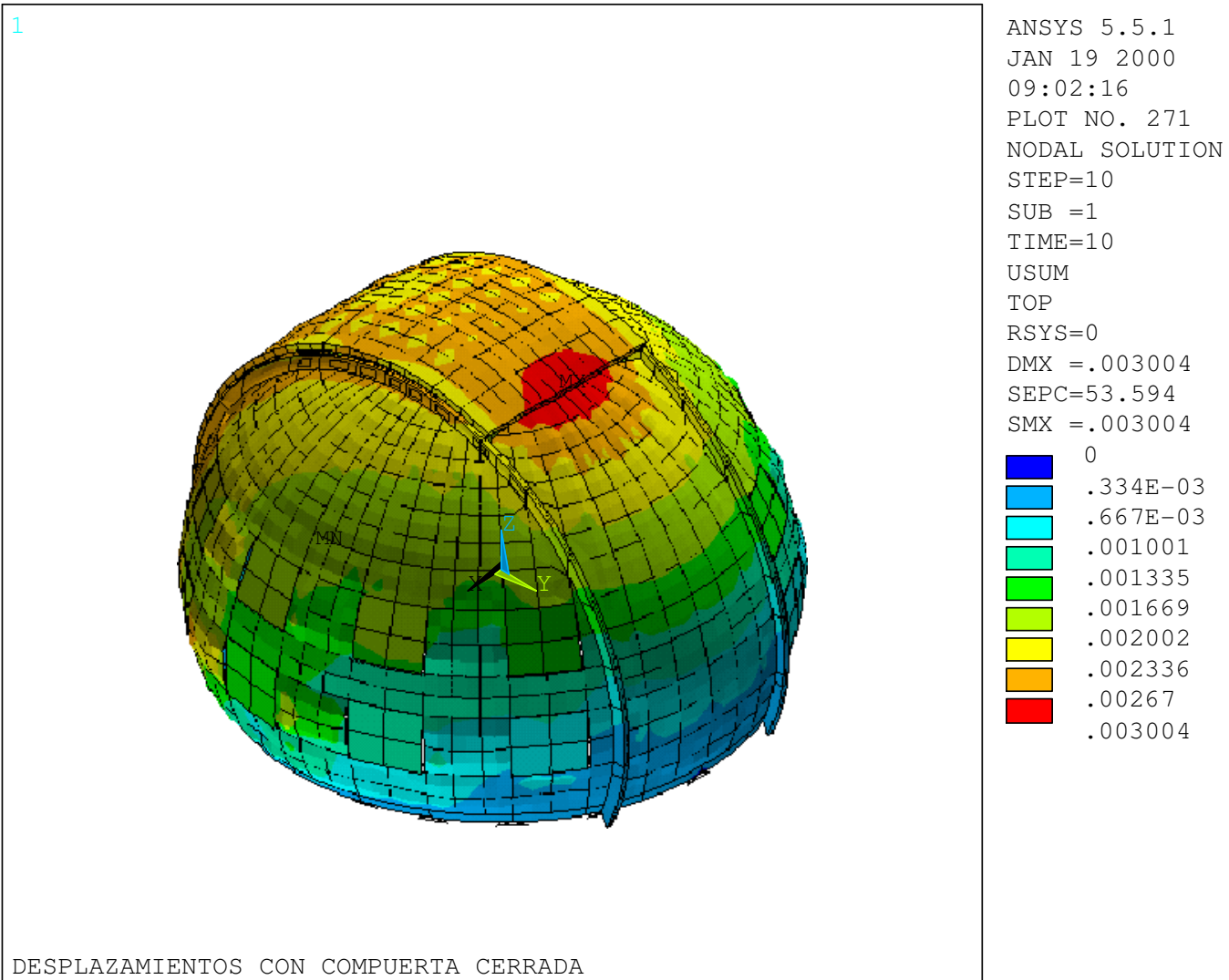
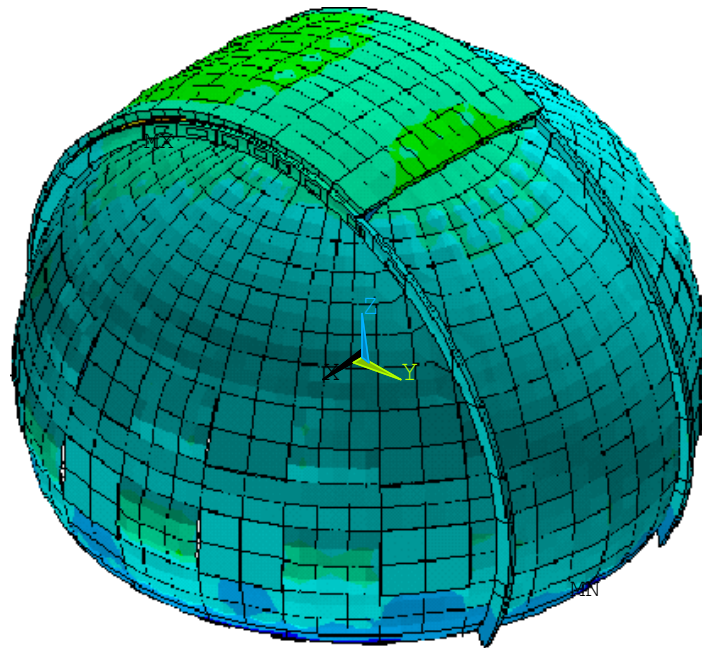


Figura 4.18

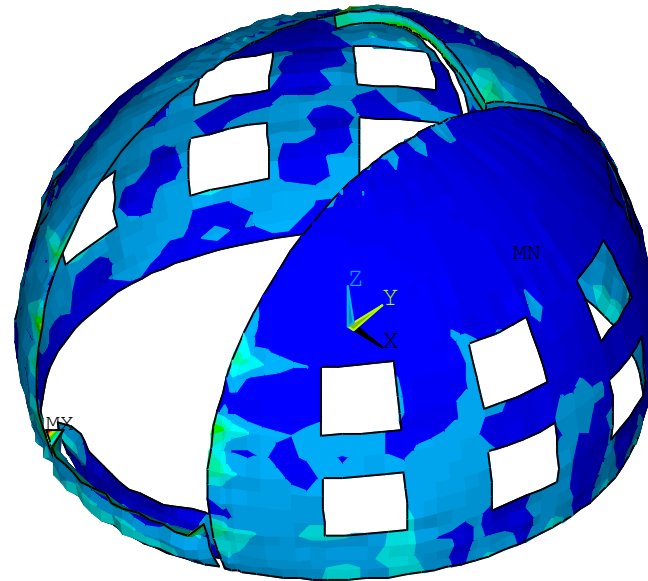
1



ANSYS 5.5.1
JAN 19 2000
09:06:16
PLOT NO. 301
NODAL SOLUTION
STEP=11
SUB =1
TIME=11
USUM
TOP
RSYS=0
DMX =.003805
SEPC=53.347
SMX =.003805
0
.423E-03
.846E-03
.001268
.001691
.002114
.002537
.00296
.003382
.003805

DESPLAZAMIENTOS CON COMPUERTA CERRADA

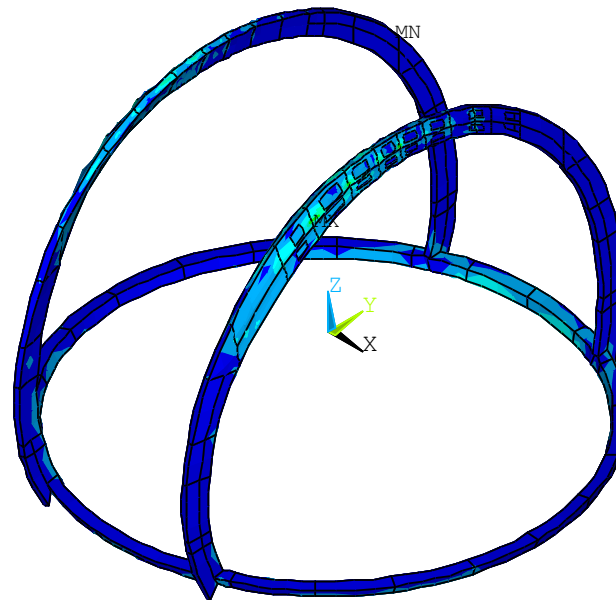
1



ANSYS 5.5.1
FEB 23 2000
11:34:34
NODAL SOLUTION
STEP=5
SUB =1
TIME=5
SEQV (AVG)
TOP
DMX =.010162
SMN =537199
SMX =.100E+09
SMXB=.116E+09
537199
.116E+08
.227E+08
.337E+08
.448E+08
.558E+08
.669E+08
.779E+08
.890E+08
.100E+09

TENSIONES, EN CHAPA DE CIERRE. COMPUERTAS CERRADAS

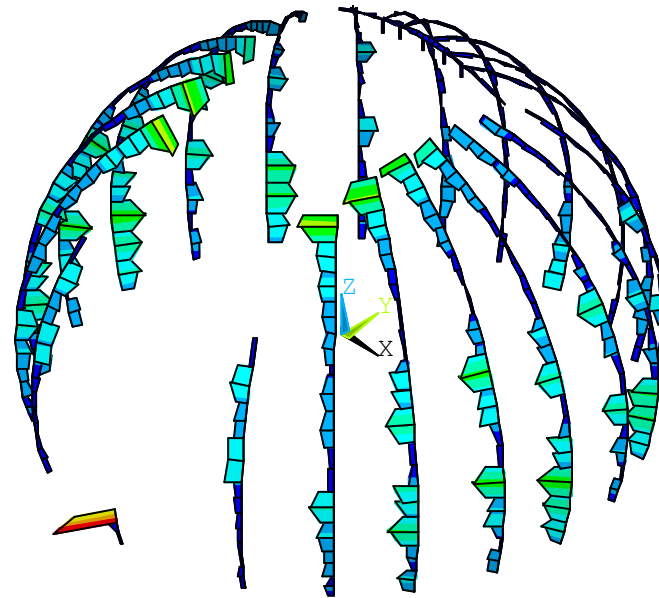
1



ANSYS 5.5.1
FEB 23 2000
11:47:12
NODAL SOLUTION
STEP=2
SUB =1
TIME=2
SEQV (AVG)
BOTTOM
DMX =.010942
SMN =473877
SMX =.113E+09
SMXB=.221E+09
473877
.130E+08
.254E+08
.379E+08
.504E+08
.629E+08
.753E+08
.878E+08
.100E+09
.113E+09

TENSIONES MODELO GLOBAL CON COMPUERTAS CERRADAS

1

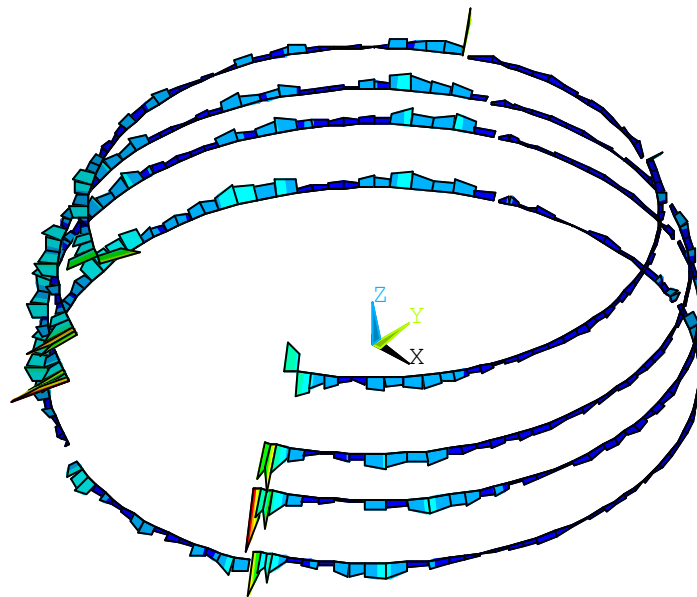


ANSYS 5.5.1
FEB 23 2000
11:57:02
LINE STRESS
STEP=6
SUB =1
TIME=6
SIGCOI SIGCOJ
MIN =.107E+07
ELEM=7563
MAX =.125E+09
ELEM=554

■	.107E+07
■	.149E+08
■	.287E+08
■	.425E+08
■	.563E+08
■	.701E+08
■	.839E+08
■	.977E+08
■	.111E+09
■	.125E+09

TENSIONES MAXIMAS CORDONES EXTERIORES DE MERIDIANOS PRINCIPALES

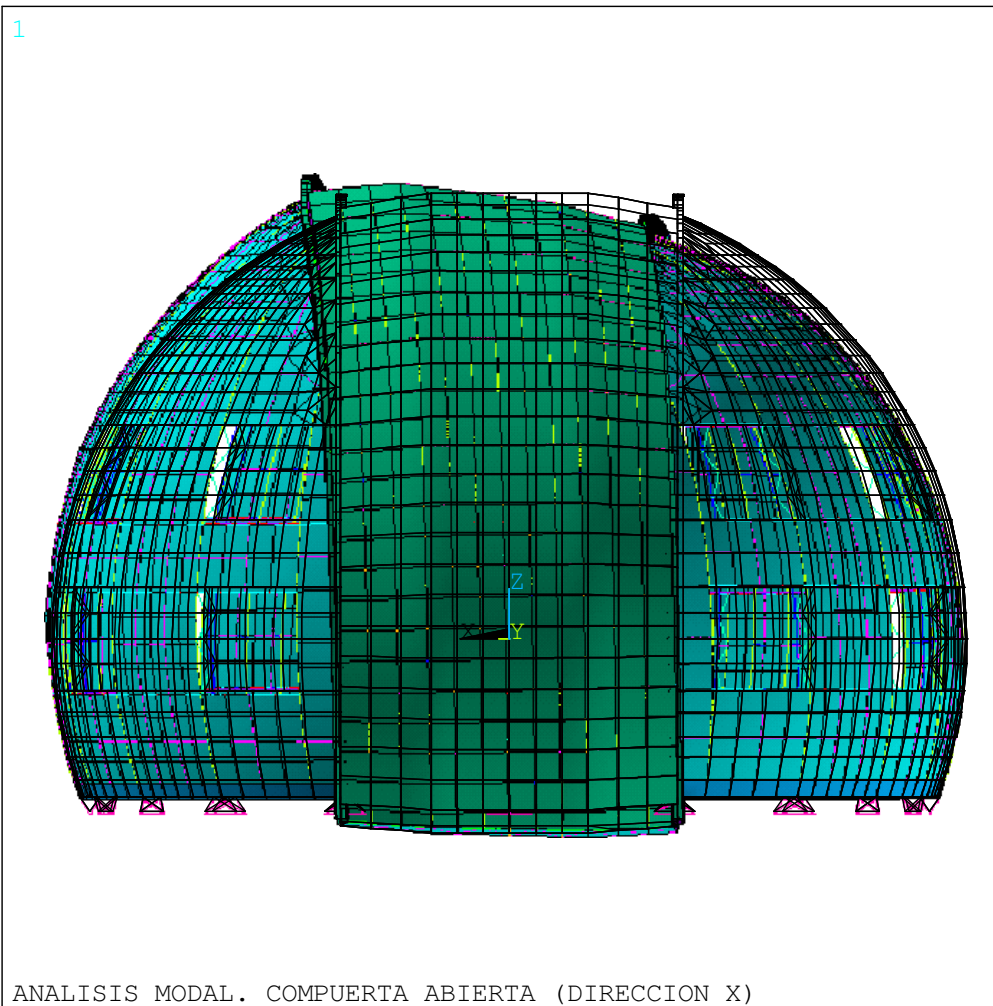
1



ANSYS 5.5.1
FEB 23 2000
12:02:16
LINE STRESS
STEP=5
SUB =1
TIME=5
SIGCOI SIGCOJ
MIN =.111E+07
ELEM=2276
MAX =.171E+09
ELEM=2437

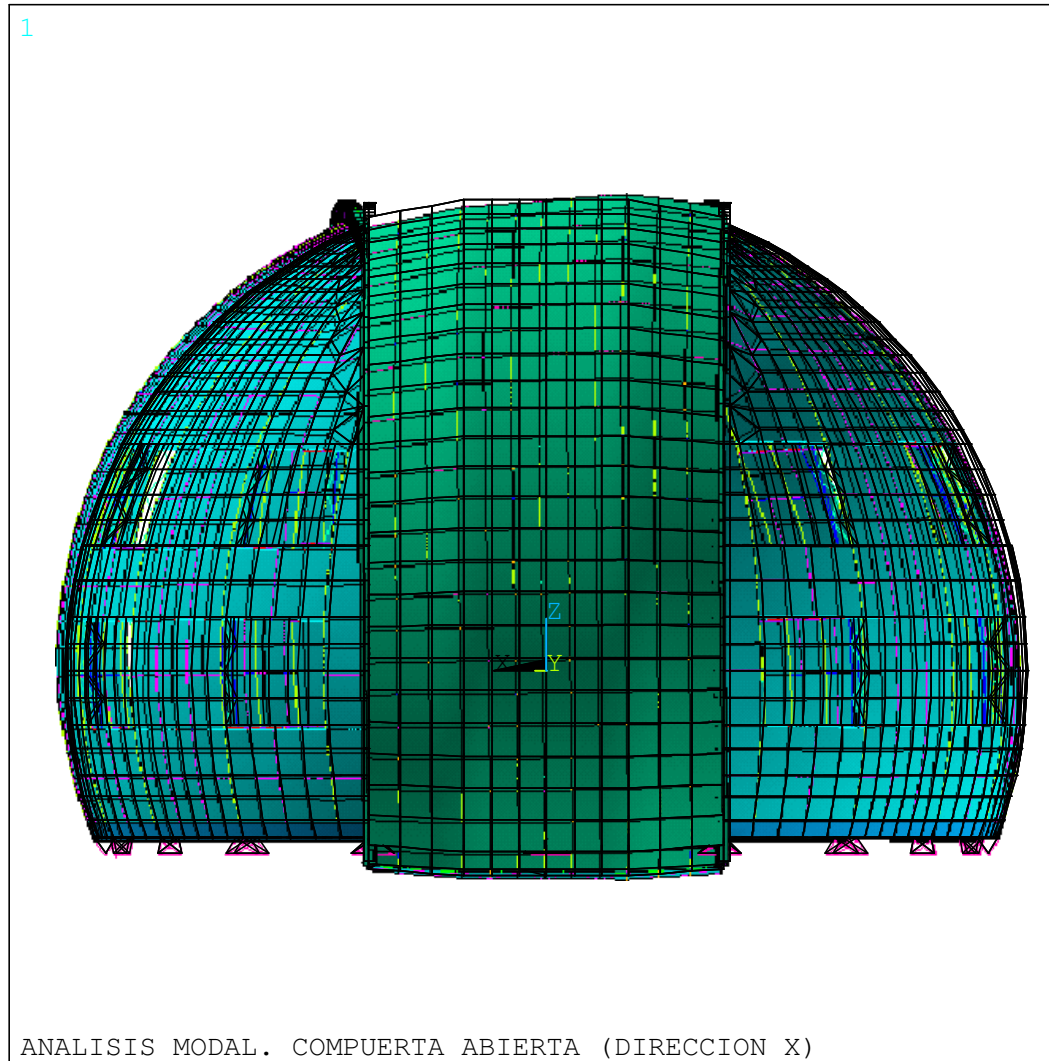
Blue	.111E+07
Light Blue	.199E+08
Cyan	.388E+08
Green	.576E+08
Yellow-Green	.764E+08
Yellow	.953E+08
Orange	.114E+09
Red-Orange	.133E+09
Red	.152E+09
Dark Red	.171E+09

TENSIONES MAXIMAS CORDONES INTERIORES DE PARALELOS PRINCIPALES



ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:09:29
PLOT NO. 1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=4.33
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.004072

DSCA=449.911
YV =1
DIST=19.273
XF =.169973
YF =-.119013
ZF =4.969
VUP =Z
Z-BUFFER



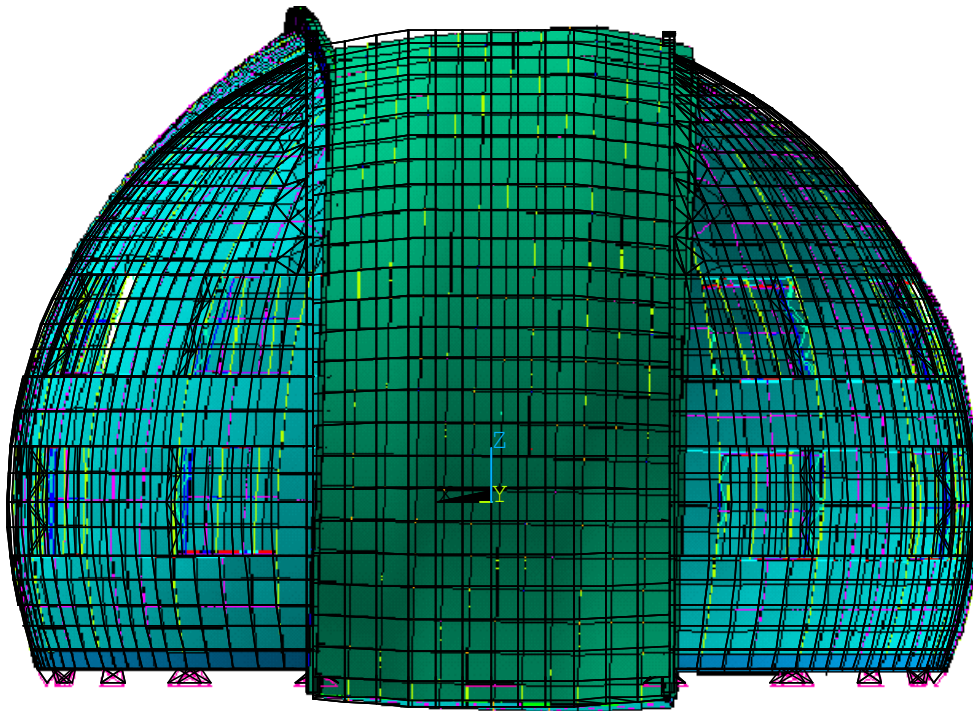
ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:10:32
PLOT NO. 2
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=6.943
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.006346

DSCA=288.66
YV =1
DIST=19.275
XF =.282877
YF =-.071741
ZF =4.926
VUP =Z
Z-BUFFER

5.1

Figura 5.2

1



ANALISIS MODAL. COMPUERTA ABIERTA (DIRECCION X)

ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:11:32
PLOT NO. 3
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =5
FREQ=10.272
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.005338

DSCA=343.164
YV =1
DIST=19.276
XF =-.26151
YF =-.163768
ZF =4.841
VUP =Z
Z-BUFFER

Figura 5.3

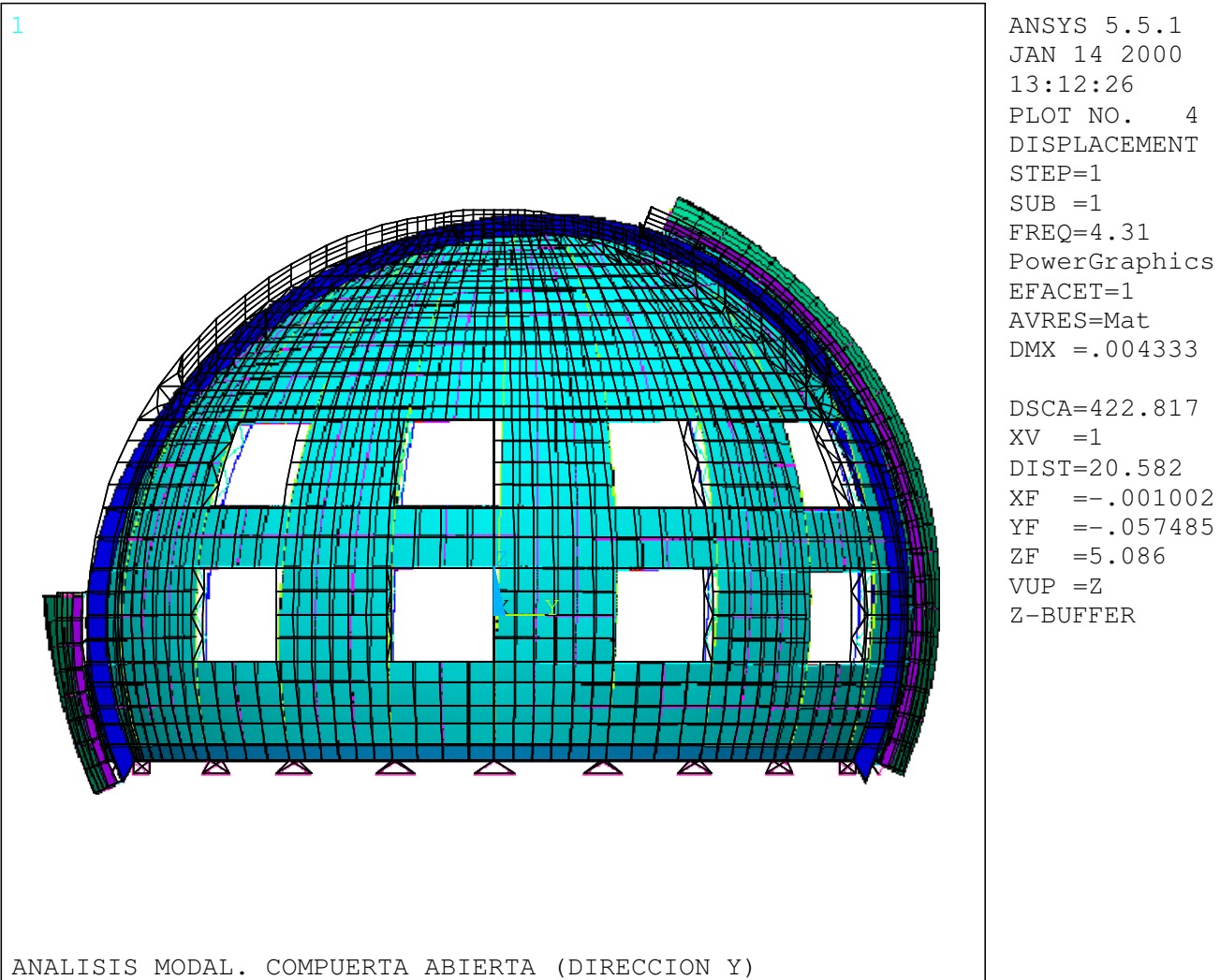
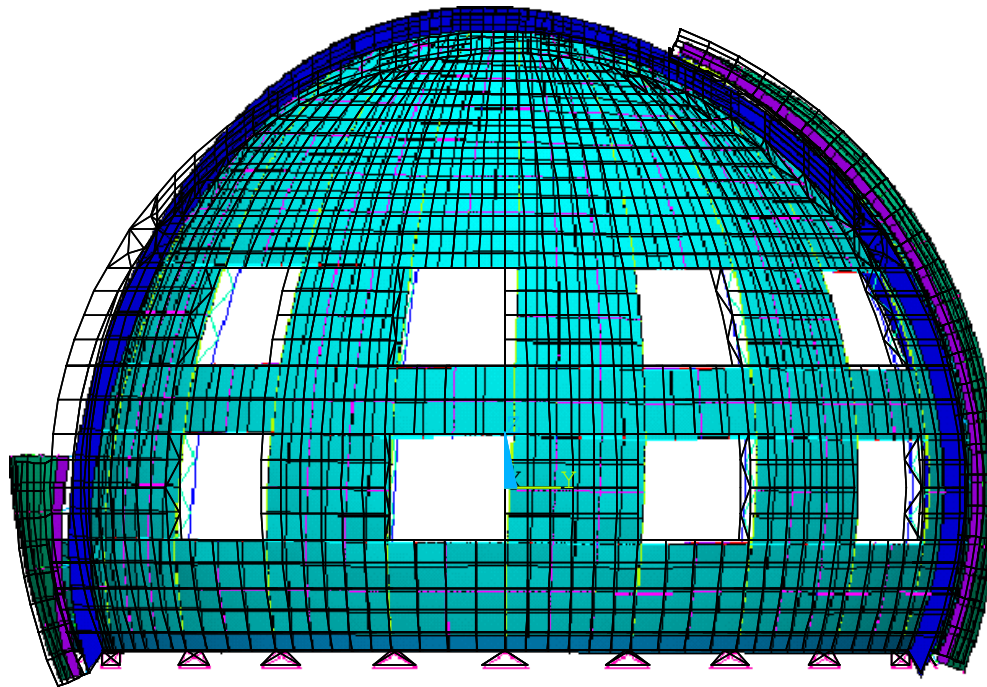


Figura 5.4

1



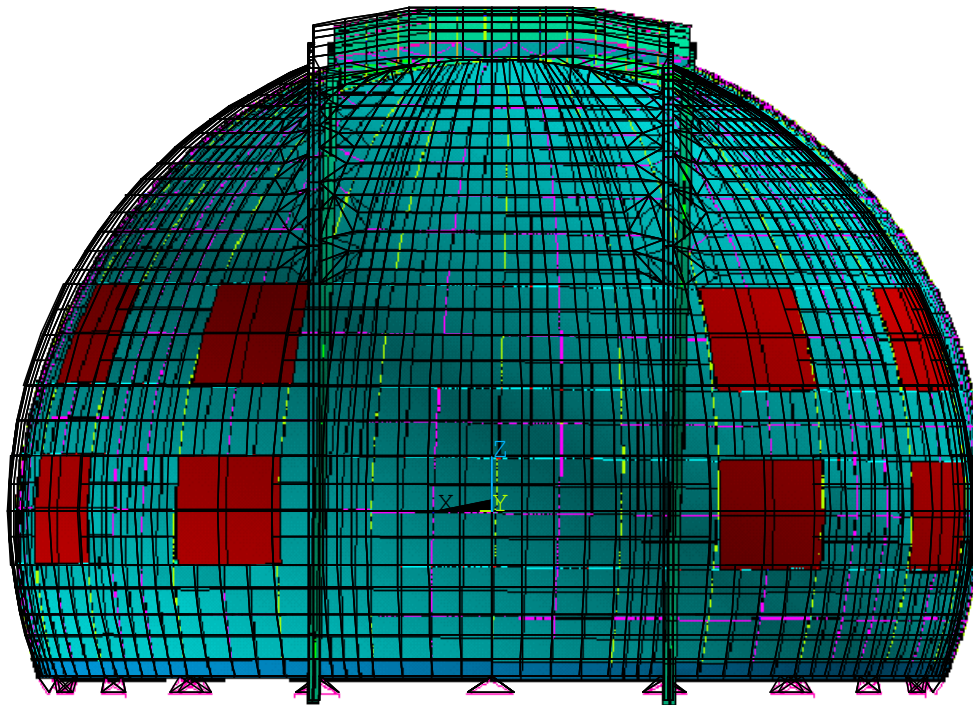
ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:13:43
PLOT NO. 5
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=7.915
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.005043

DSCA=363.27
XV =1
DIST=20.317
XF =.372E-03
YF =-.002309
ZF =4.693
VUP =Z
Z-BUFFER

ANALISIS MODAL. COMPUERTA ABIERTA (DIRECCION Y,Z)

Figura 5.5

1

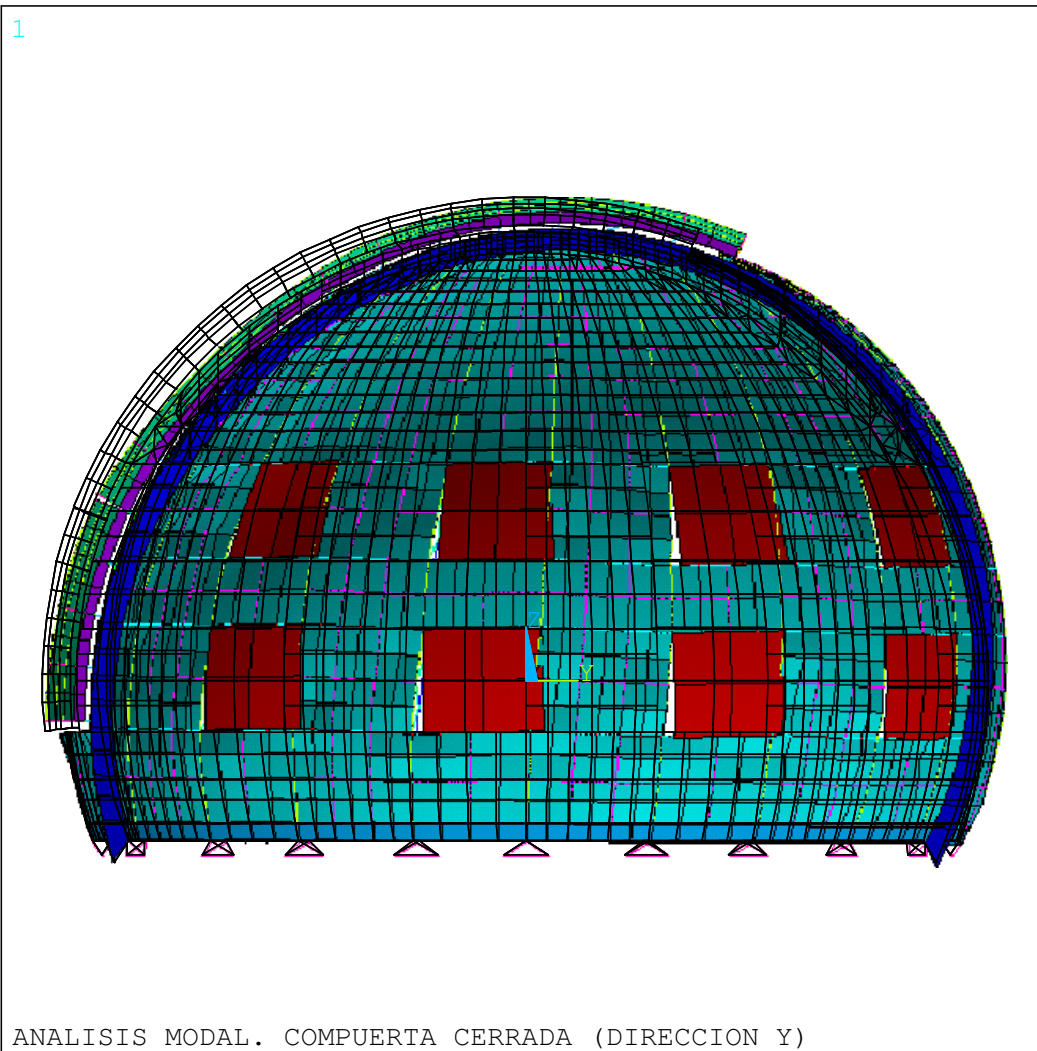


ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:05:10
PLOT NO. 1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=7.433
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.005907

DSCA=303.422
YV =1
DIST=19.33
XF =-.331195
YF =-.407247
ZF =5.667
VUP =Z
Z-BUFFER

ANALISIS MODAL. COMPUERTA CERRADA (DIRECCION X)

Figura 5.6

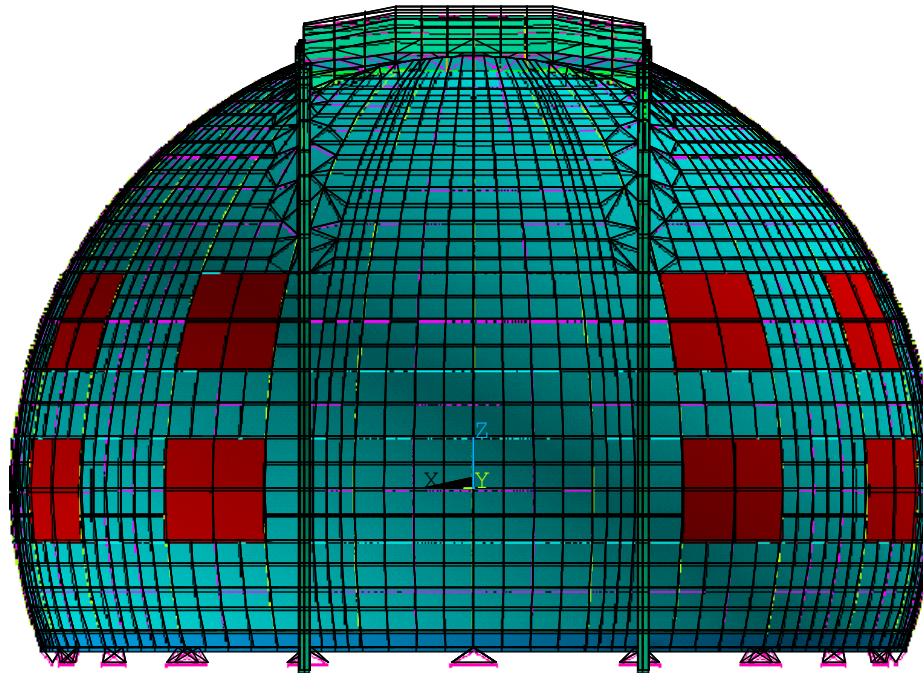


ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:06:10
PLOT NO. 2
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=6.442
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.002991

DSCA=599.24
XV =1
DIST=19.892
XF =-.184E-03
YF =.028405
ZF =5.666
VUP =Z
Z-BUFFER

Figura 5.7

1



ANSYS 5.5.1
JAN 14 2000
13:07:04
PLOT NO. 3
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=10.743
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.011643

DSCA=153.933
YV =1
DIST=19.419
XF =-.672E-04
YF =-.264482
ZF =5.549
VUP =Z
Z-BUFFER

ANALISIS MODAL. COMPUERTA CERRADA (DIRECCION Z)

Figura 5.8

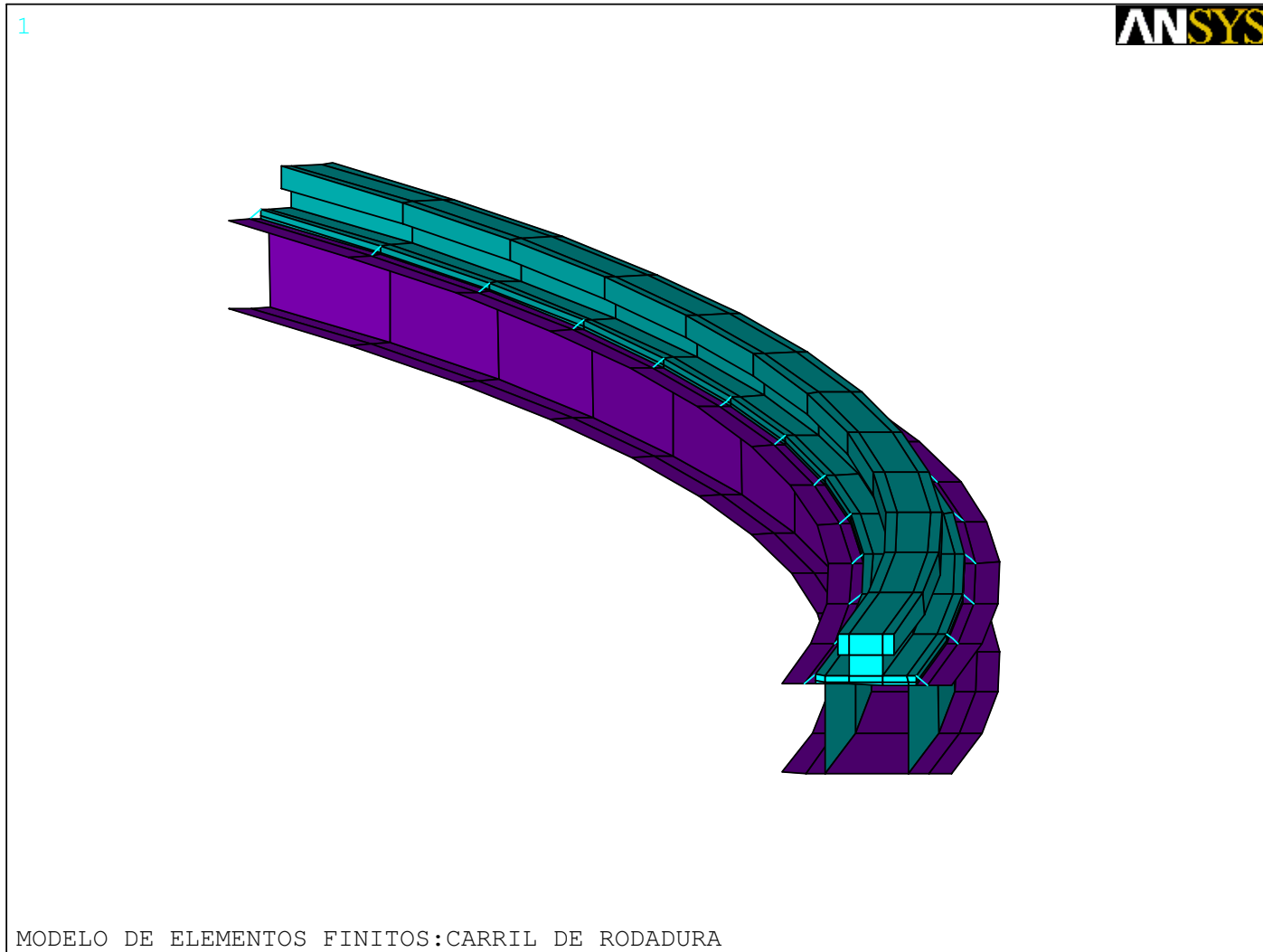
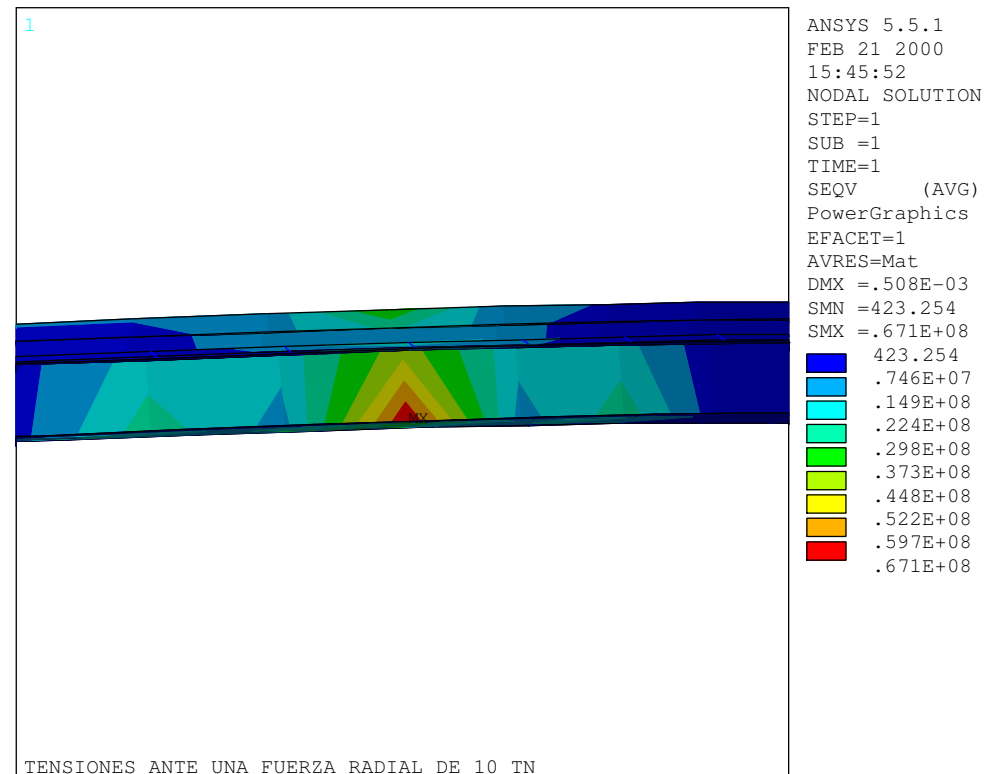
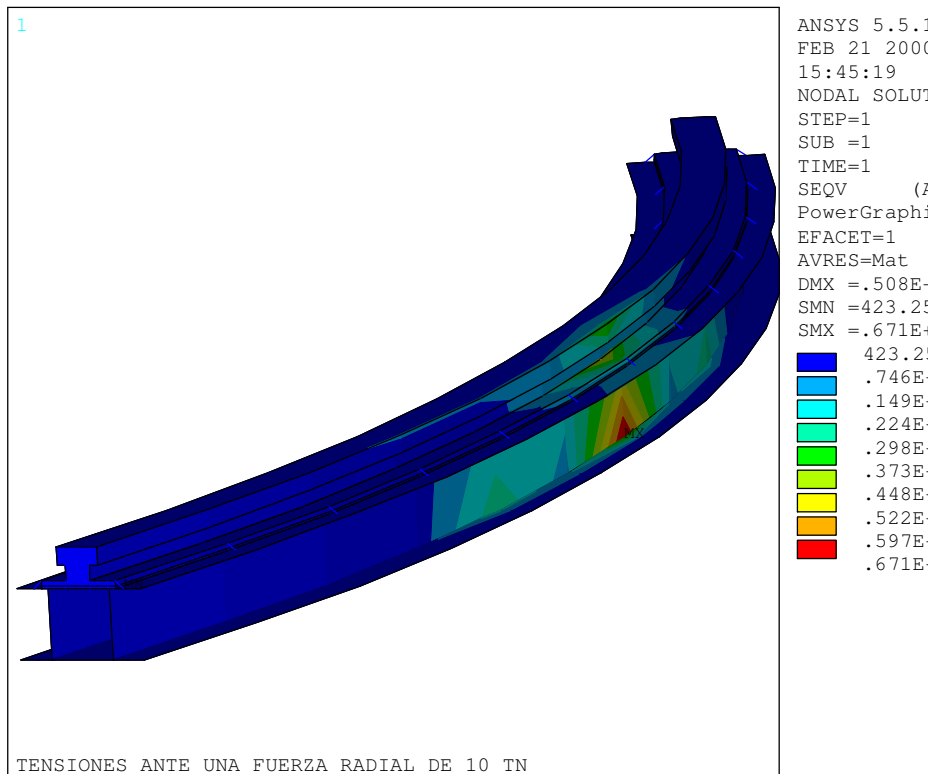


Figura 6.1 – Modelo de Elementos Finitos del Carril de Rodadura



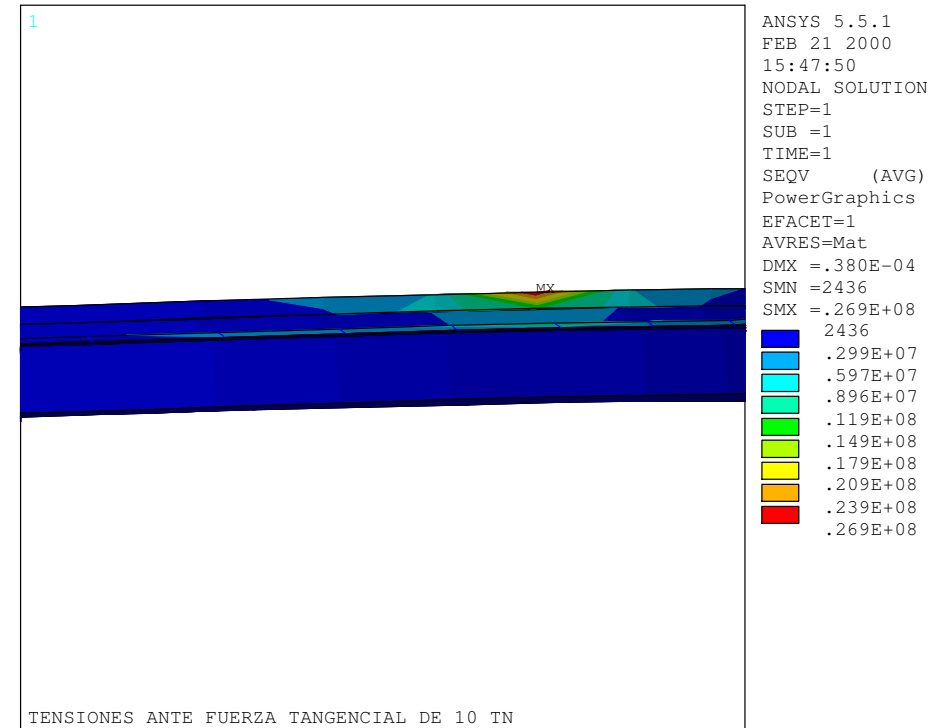
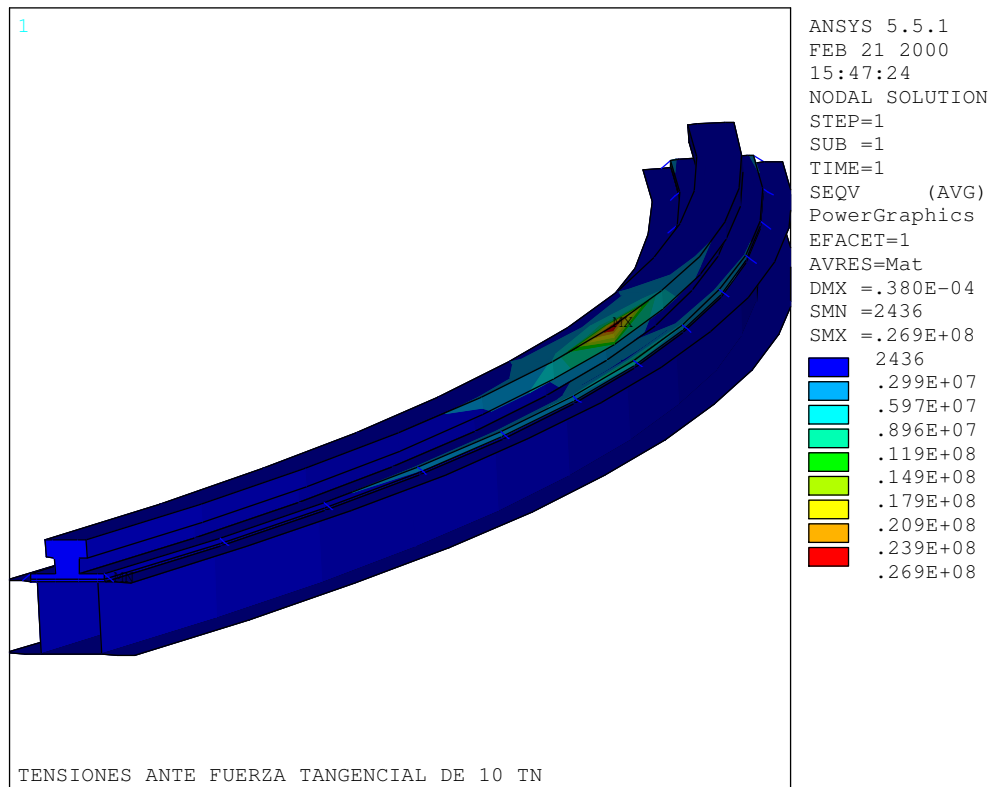


Figura 6.3 - Tensiones ante una Fuerza Tangencial de 10 Tn

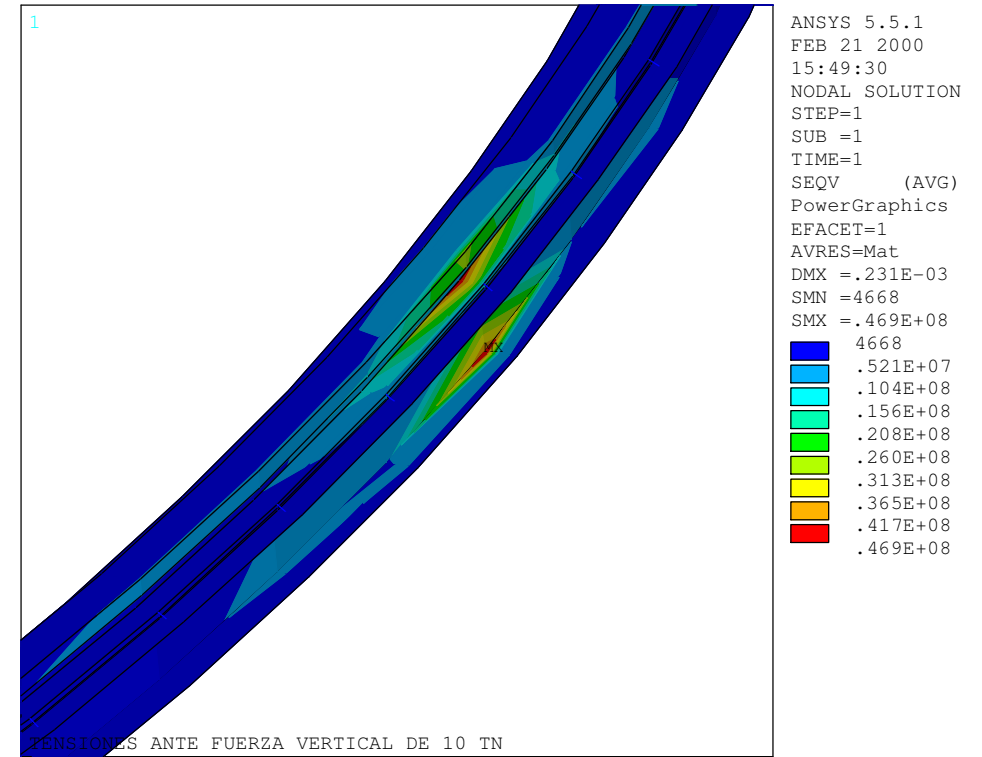
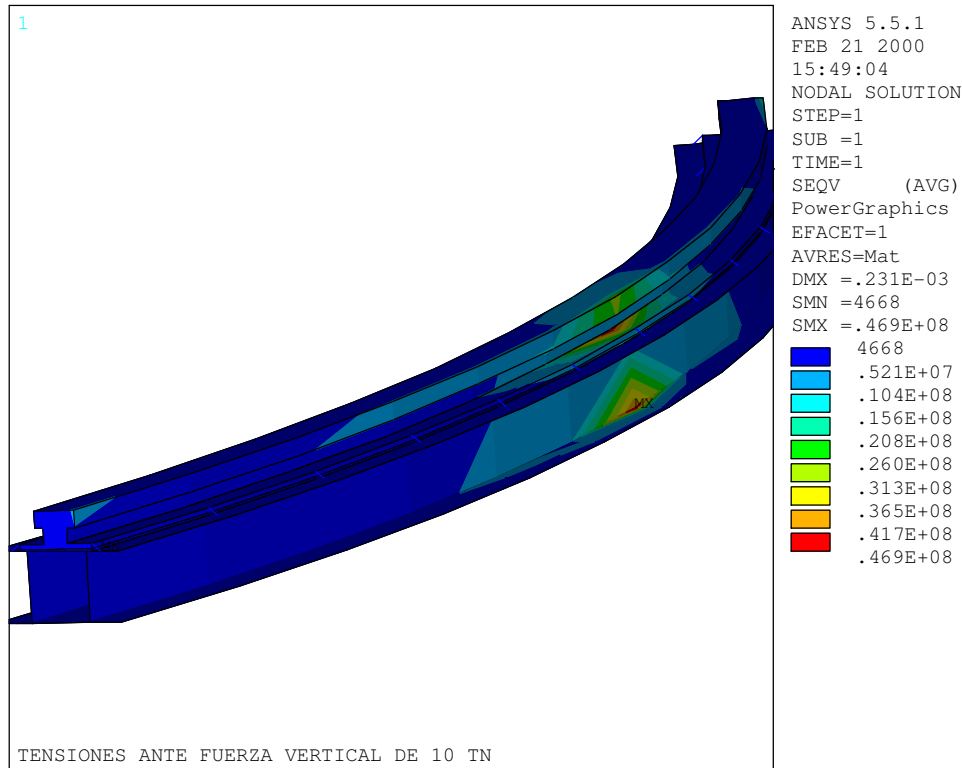


Figura 6.4 – Tensiones ante una Fuerza Vertical de 10 Tn

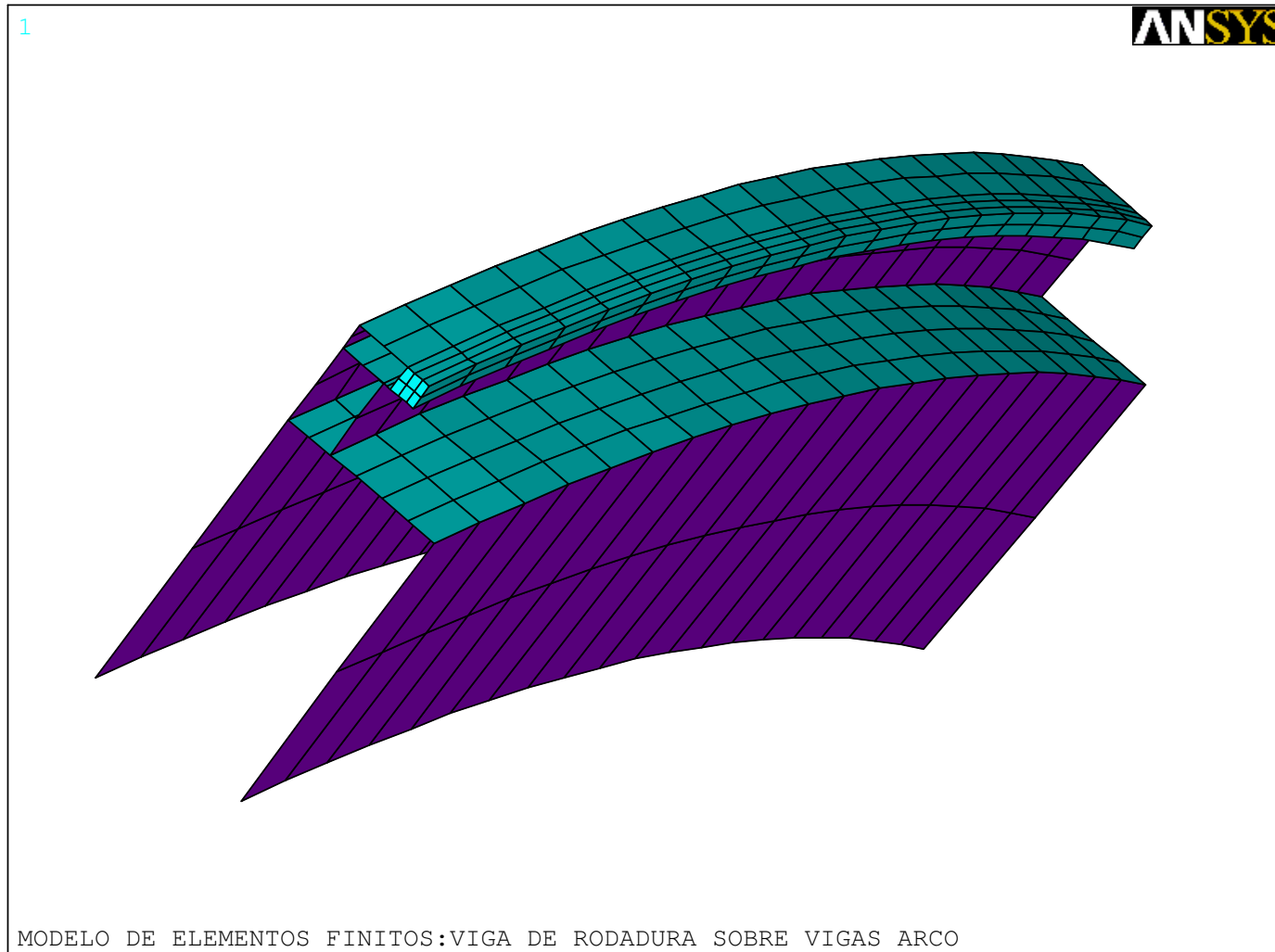


Figura 6.5 – Modelo de Elementos Finitos. Viga de Rodadura sobre Vigas Arco

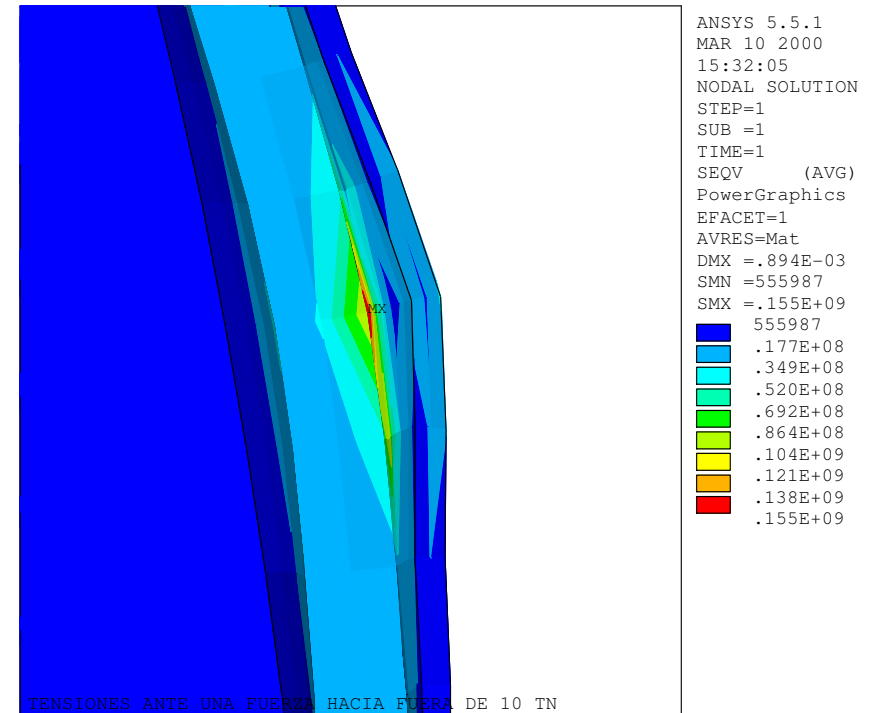
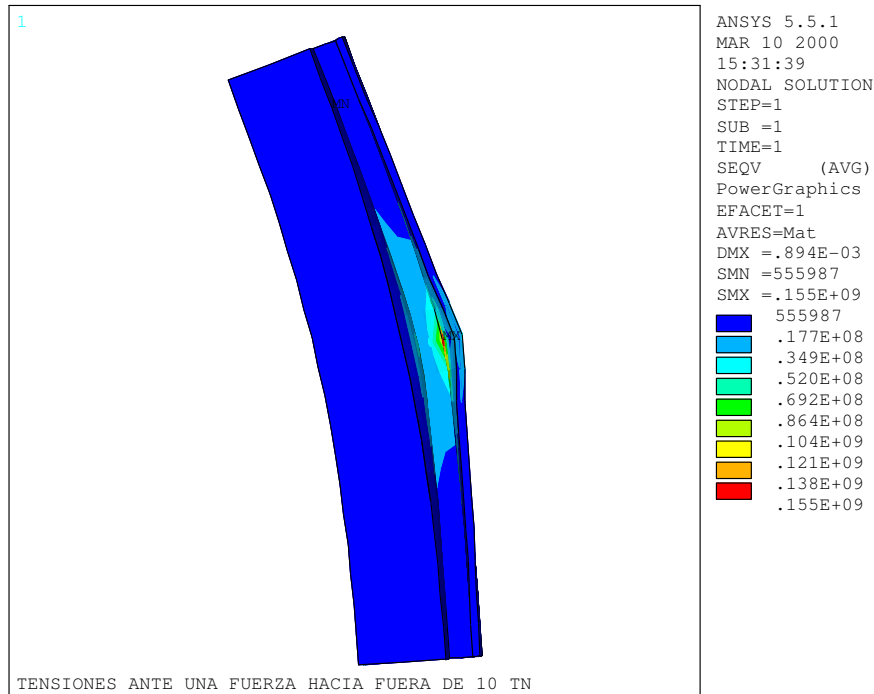


Figura 6.6 – Tensiones en el Carril Antivuelco ante una Fuerza hacia fuera de 10 Tn

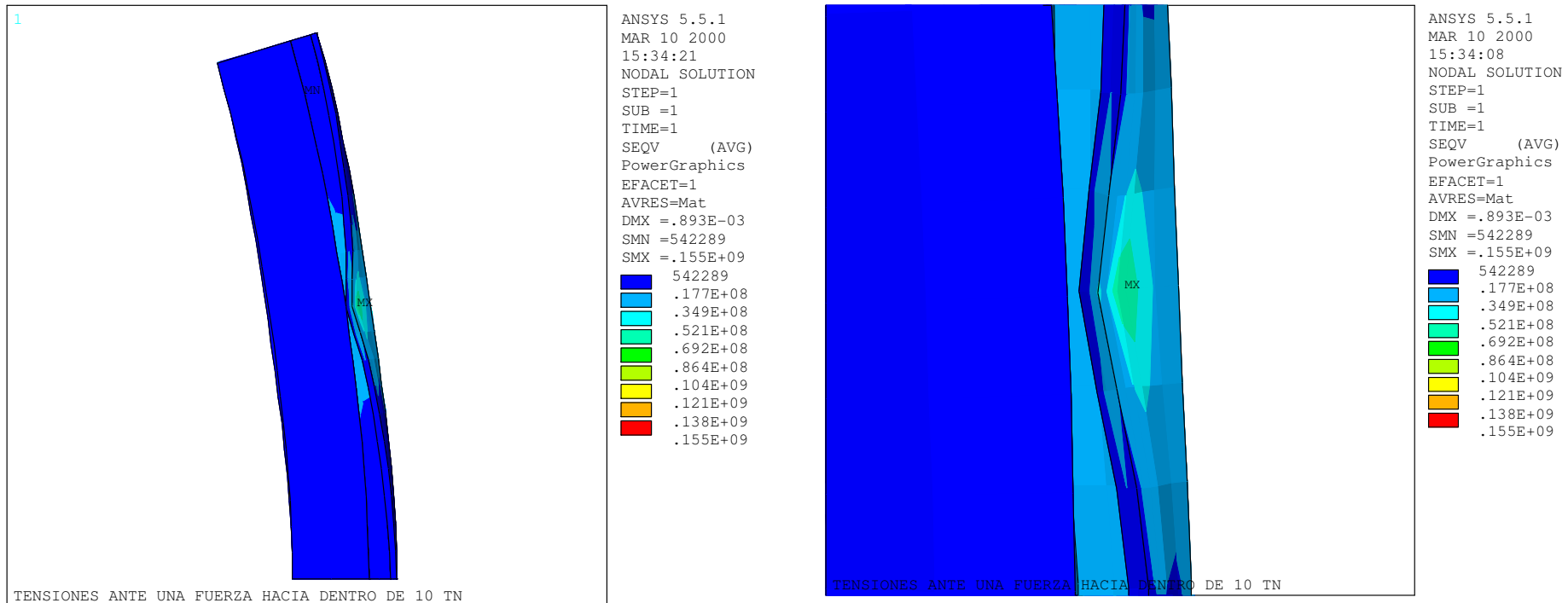


Figura 6.7 – Tensiones ante una fuerza radial hacia dentro de 10 Tn

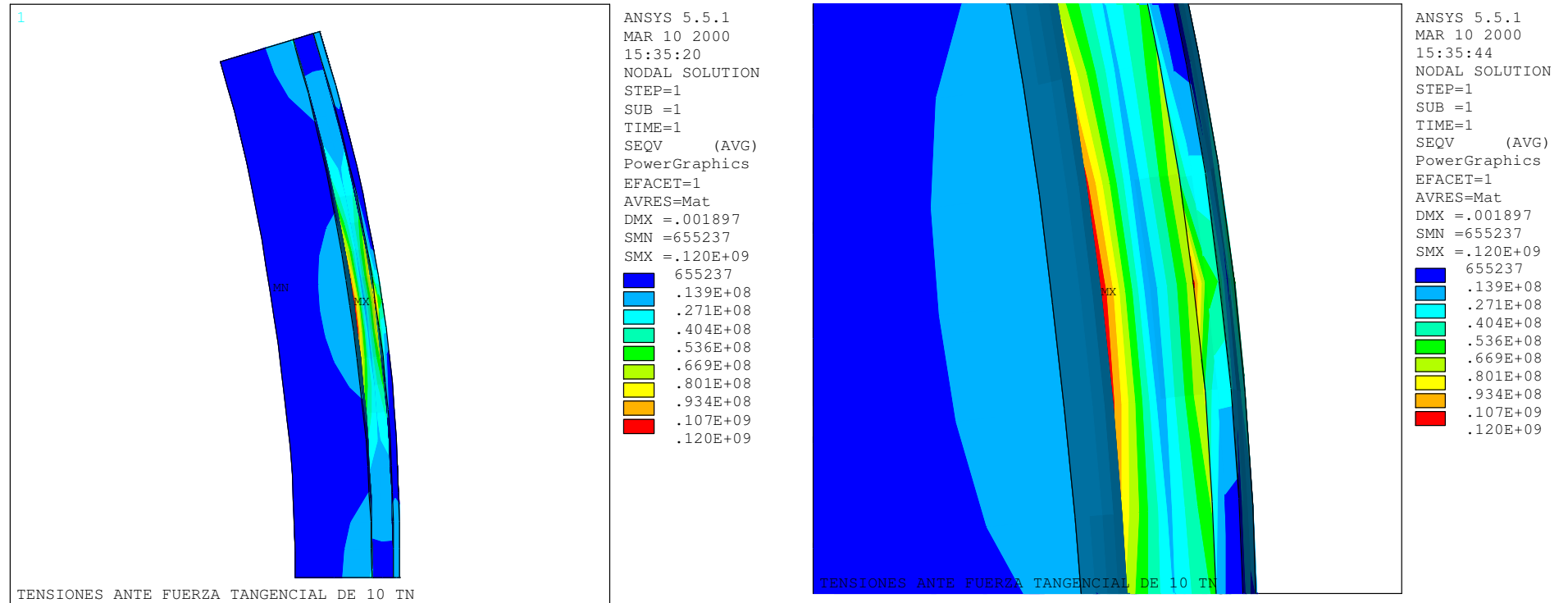


Figura 6.8 – Tensiones ante una Fuerza Tangencial de 10 Tn

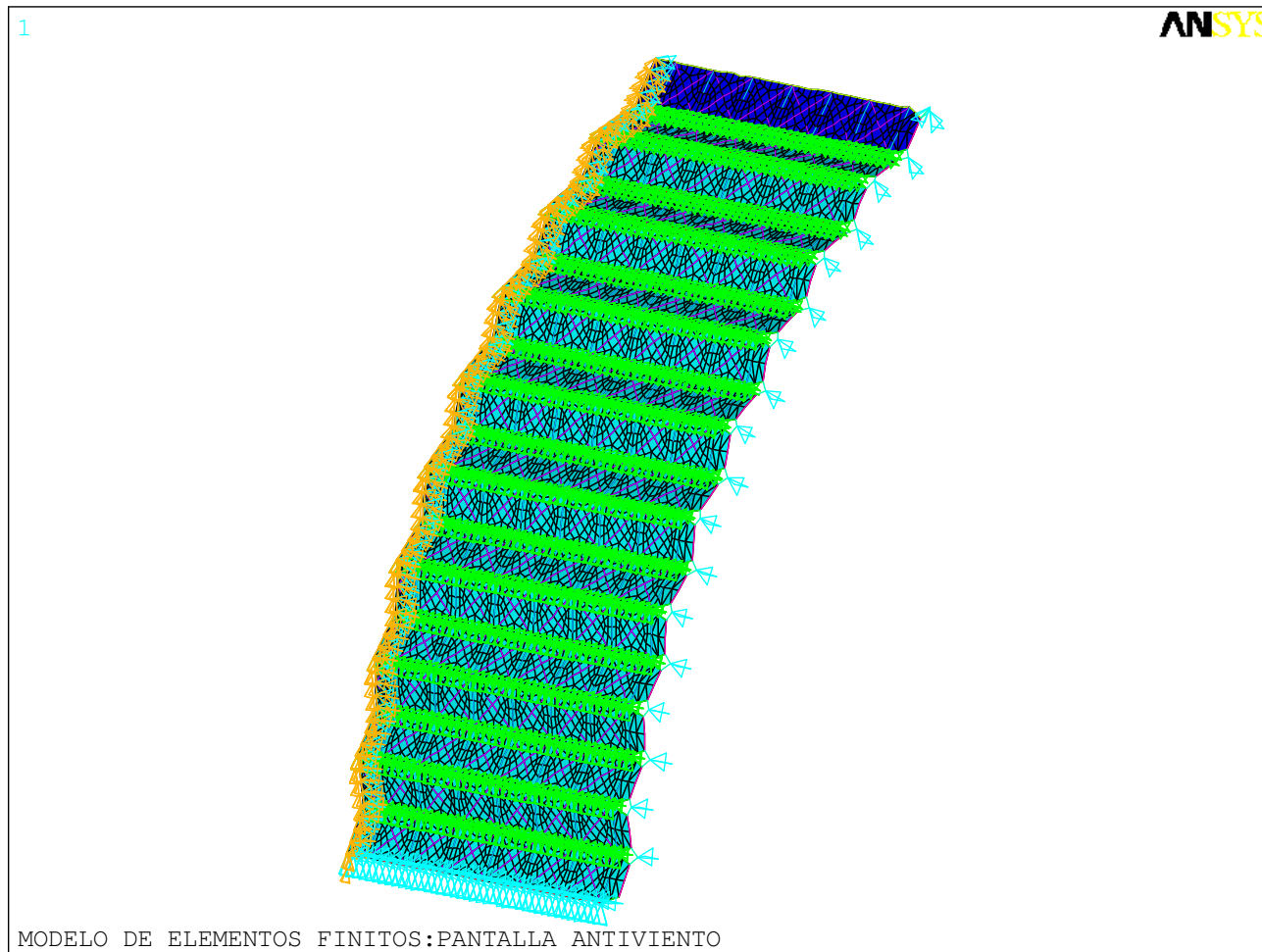


Figura 6.9 - Modelo de Elementos Finitos de la Pantalla Antiviento

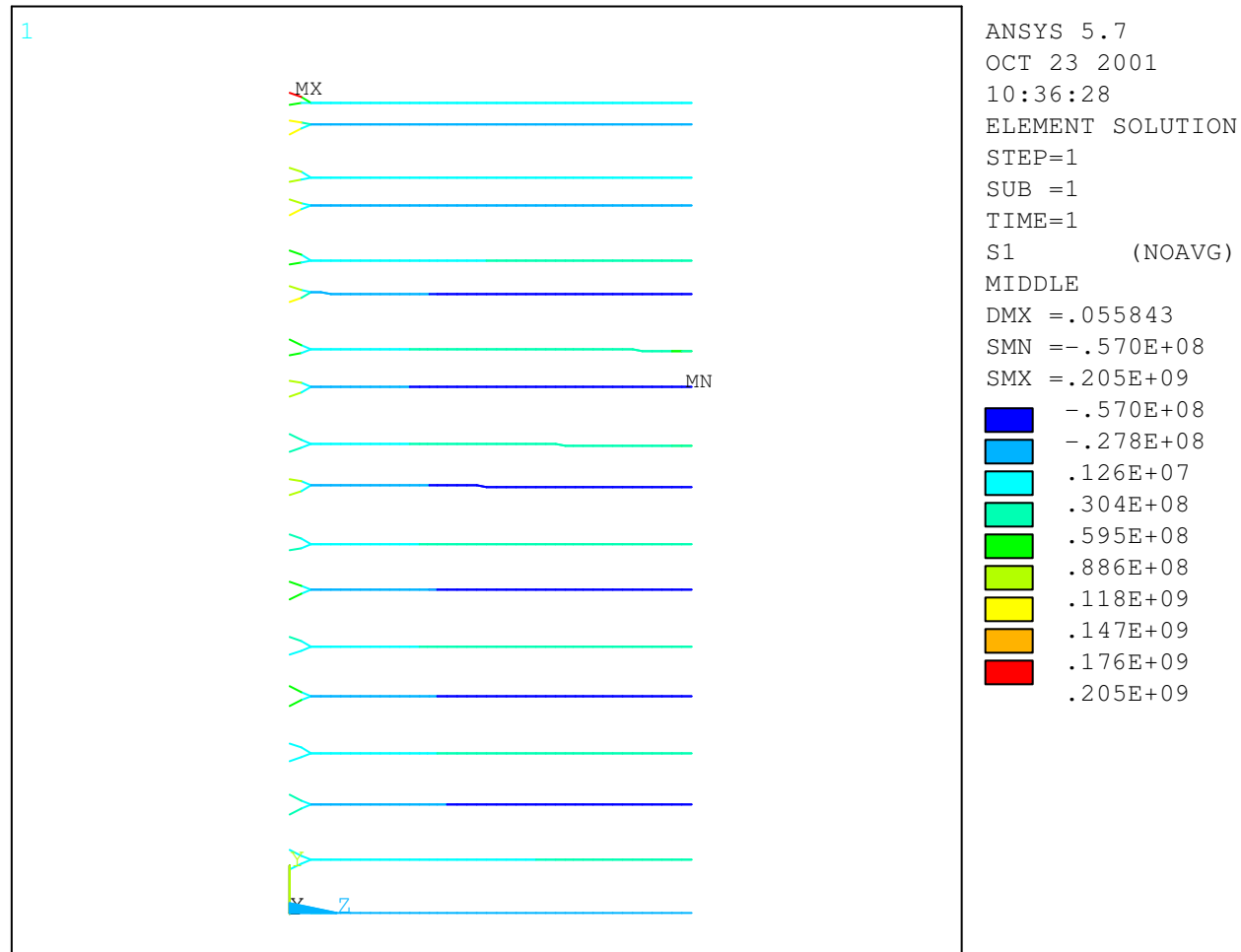


Figura 6.10 - Tensiones en Marcos Horizontales con Carga de Peso Propio y Viento

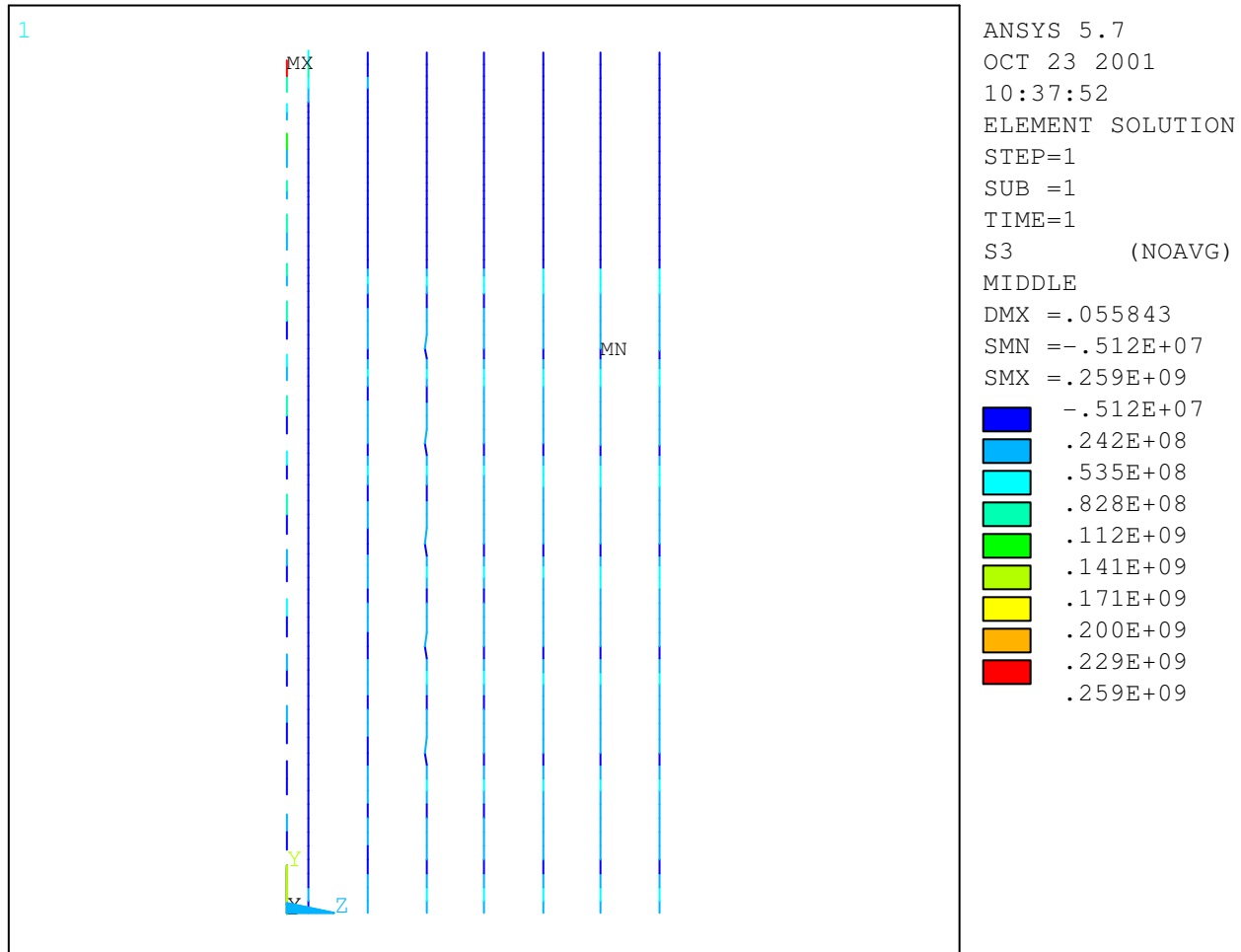


Figura 6.11 – Tensiones en Marcos Verticales con Carga de Peso Propio y Viento

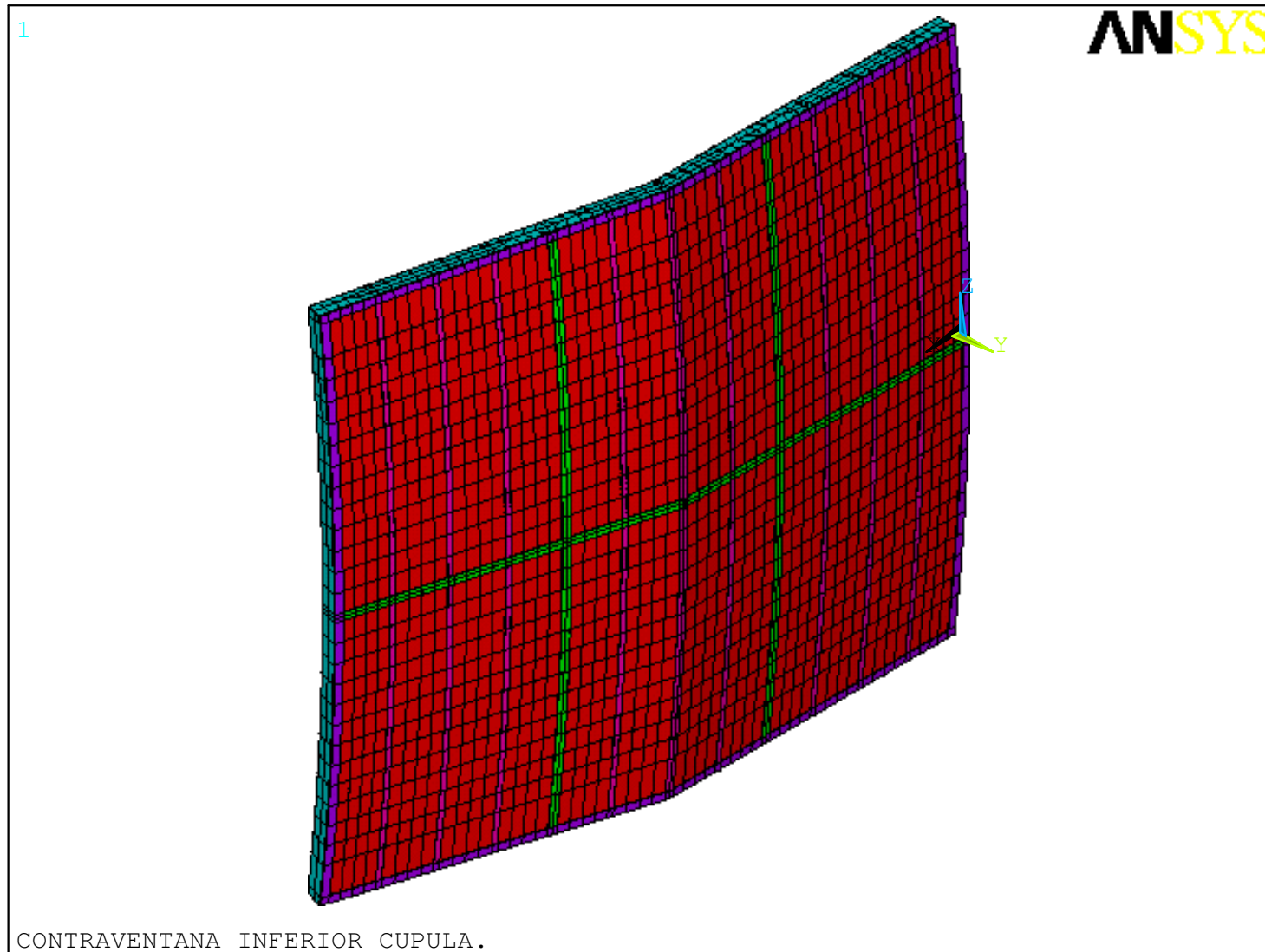


Figura 6.12

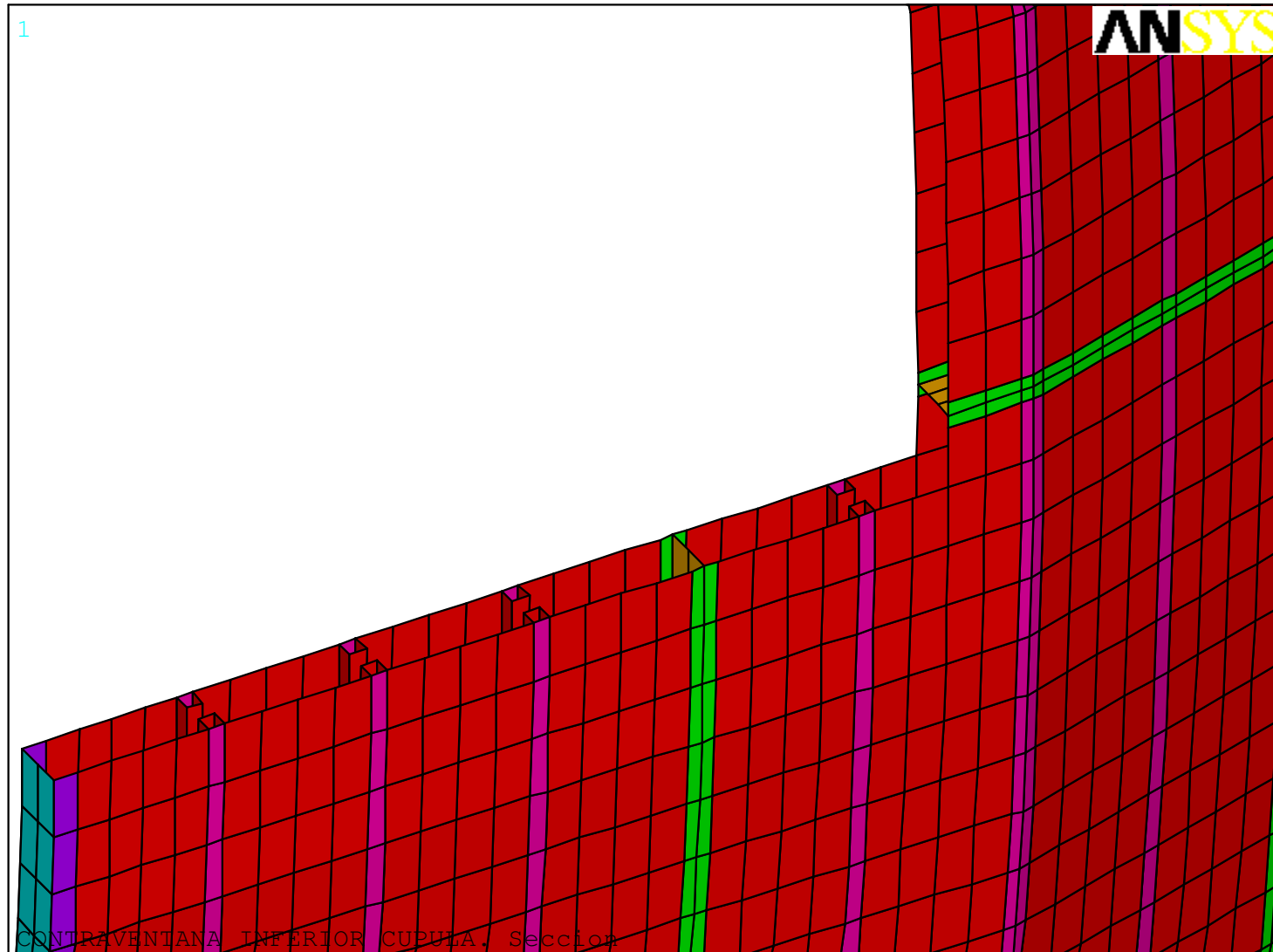


Figura 6.13

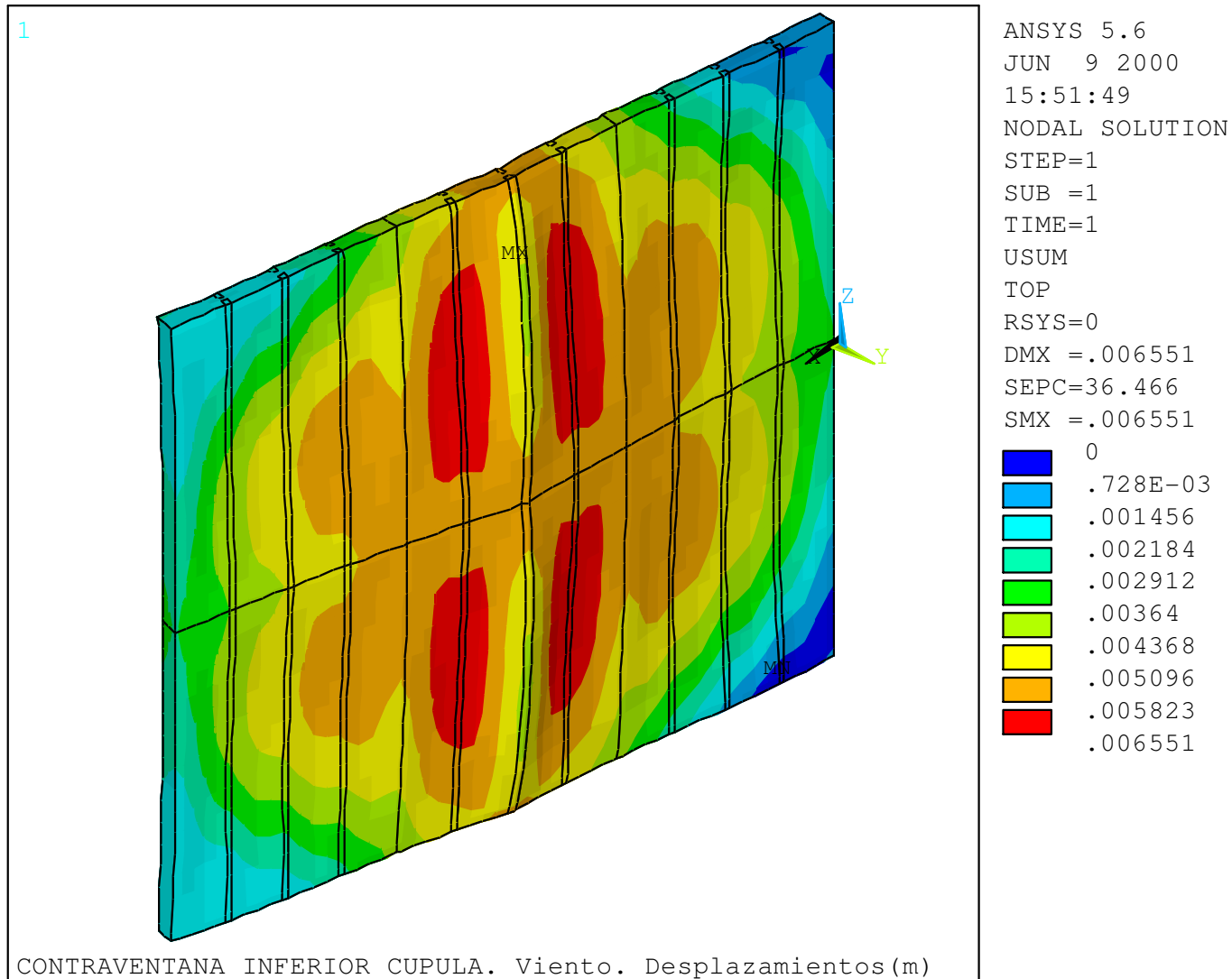


Figura 6.14

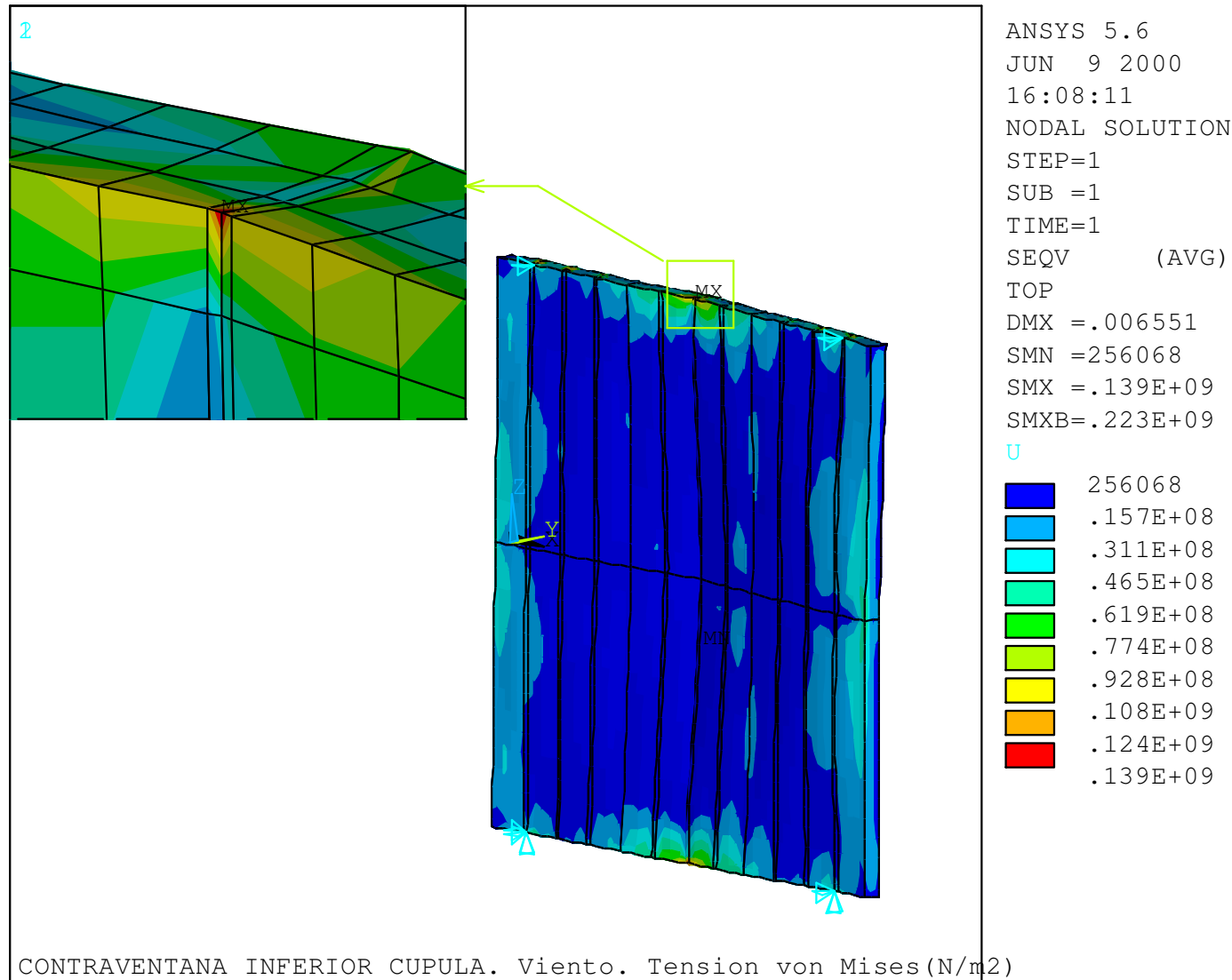


Figura 6.15

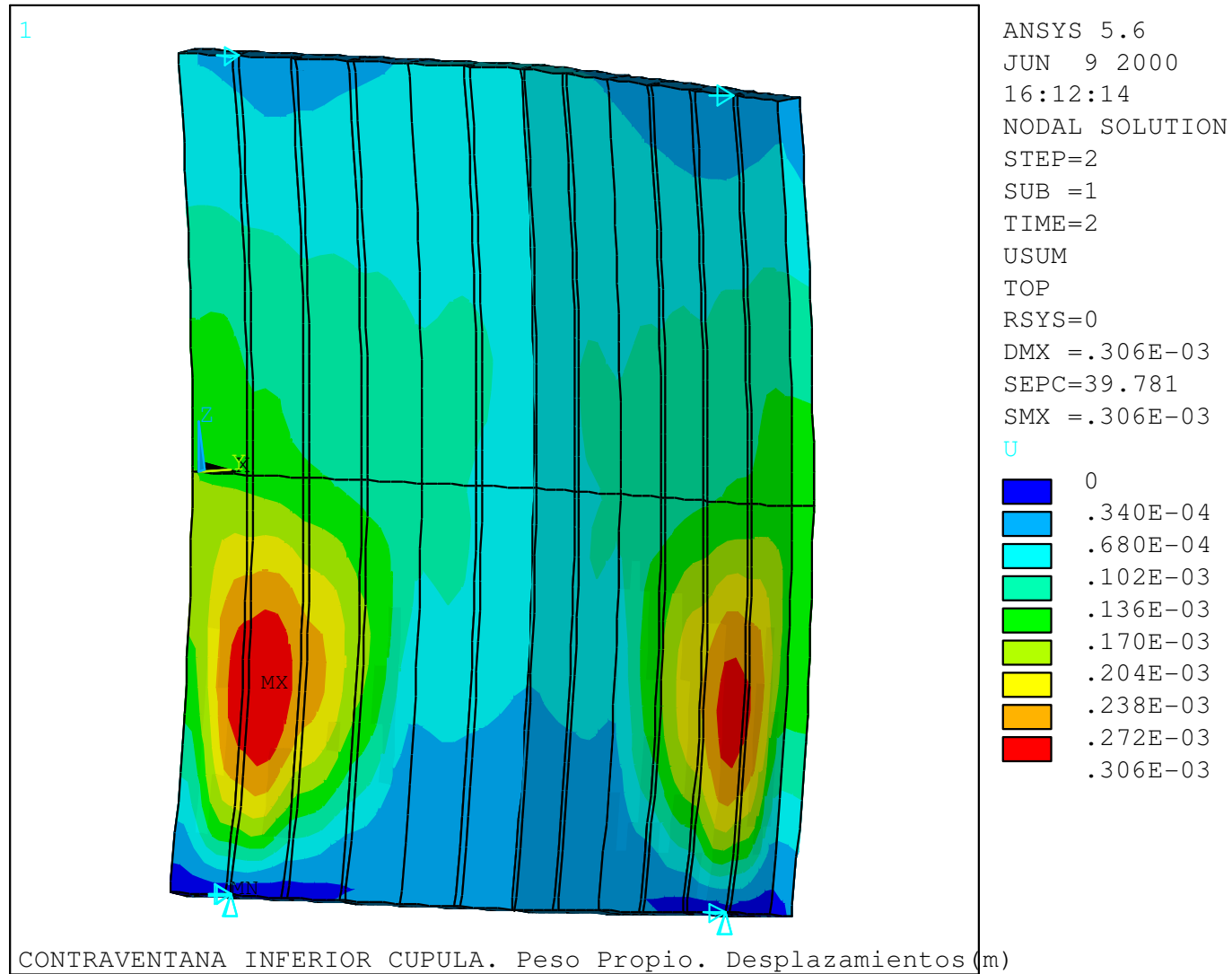


Figura 6.16

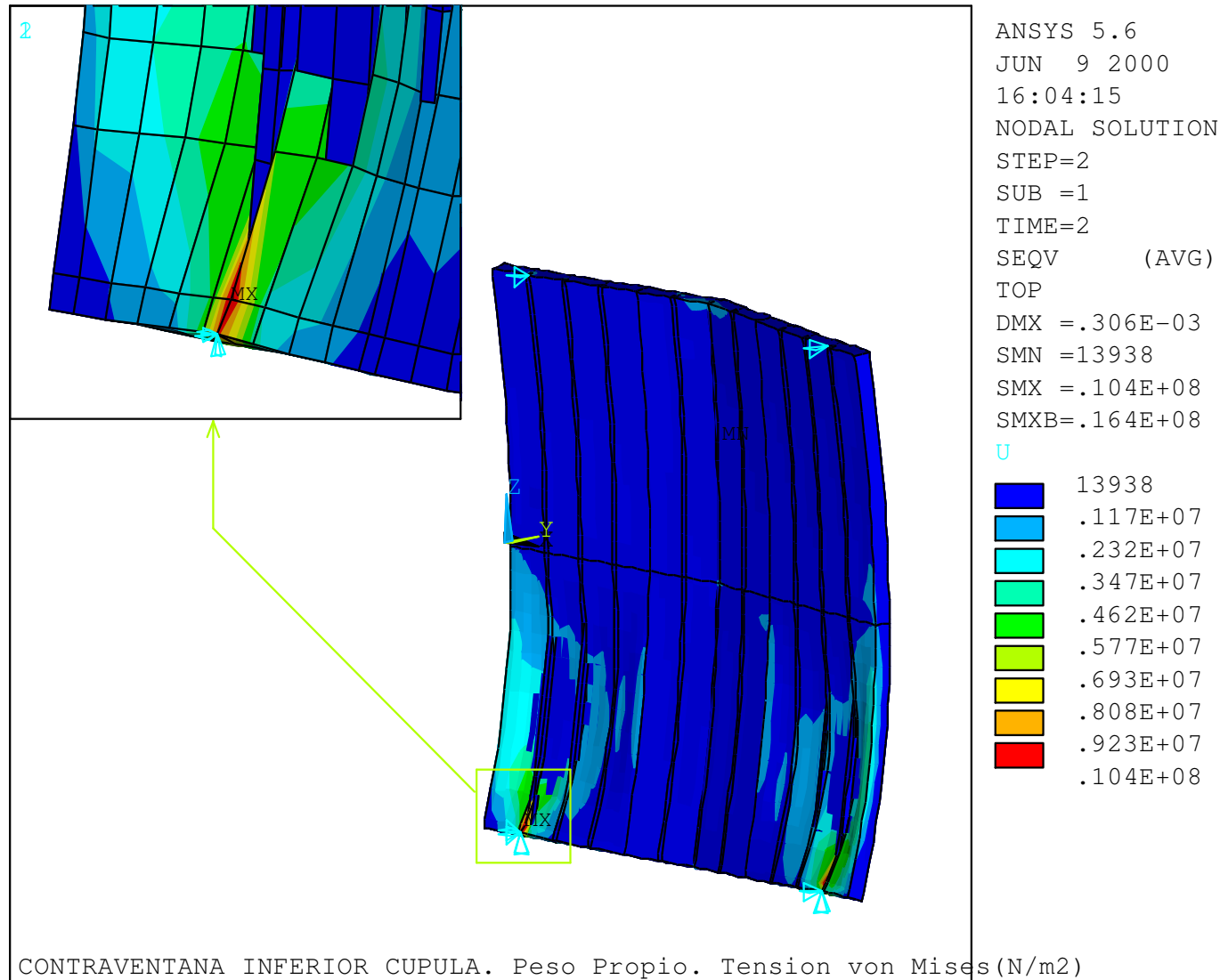


Figura 6.17