



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010118

**DISEÑO, CÁLCULO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA
AUTOMÁTICO DE CARGA DE BARCAZAS DE 10000 TONELADAS
MEDIANTE CARGADOR POLAR**

DOCUMENTO I

MEMORIA

D. RUBINES SALDAÑA, SERGIO

TUTOR ACADÉMICO: D. DEL COZ DÍAZ, JUAN JOSÉ

TUTOR EMPRESA: D. PRADO TAMARGO, JOSÉ RAMÓN

FECHA: JULIO 2018

ÍNDICE MEMORIA

1. Objeto y alcance del proyecto	6
2. Introducción al manejo de material a granel	7
3. Cargadores de barcos	8
3.1.- <i>Tipos de barcos de transporte.....</i>	<i>9</i>
3.2.- <i>Tipos de cargadores de barcos.....</i>	<i>12</i>
3.3.- <i>Cargadores polares.....</i>	<i>16</i>
4. Especificaciones impuestas por el cliente	23
5. Diseño de la instalación	26
5.1.- <i>Diseño preliminar.....</i>	<i>26</i>
5.2.- <i>Proceso de diseño</i>	<i>28</i>
6. Cálculo de la cinta transportadora.....	30
6.1.- <i>Cálculo manual de la cinta transportadora</i>	<i>30</i>
6.1.1.- <i>Cálculo de la velocidad y del ancho de banda.....</i>	<i>32</i>
6.1.2.- <i>Cálculo simplificado.....</i>	<i>35</i>
6.1.3.- <i>Cálculo completo.....</i>	<i>38</i>
6.2.- <i>Cálculo computerizado de la cinta transportadora.....</i>	<i>41</i>
6.2.1.- <i>Cálculo simplificado.....</i>	<i>41</i>
6.2.2.- <i>Cálculo completo.....</i>	<i>42</i>
6.3.- <i>Cálculo computerizado de la cinta transportadora en BeltStat.....</i>	<i>43</i>
7. Cálculo de las cargas	44
7.1.- <i>Cargas sobre la pluma</i>	<i>44</i>
7.1.1.- <i>Cargas principales.....</i>	<i>44</i>
7.1.2.- <i>Cargas adicionales</i>	<i>45</i>
7.1.3.- <i>Cargas especiales.....</i>	<i>45</i>
7.1.4.- <i>Casos de carga</i>	<i>46</i>
7.2.- <i>Cargas sobre el cradle.....</i>	<i>47</i>

7.2.1.-	Cargas principales.....	47
7.2.2.-	Cargas adicionales	48
7.2.3.-	Cargas especiales.....	49
7.2.4.-	Casos de carga	49
7.3.-	<i>Cargas sobre la base y la torre.....</i>	<i>51</i>
7.3.1.-	Cargas principales.....	51
7.3.2.-	Cargas adicionales	52
7.3.3.-	Cargas especiales.....	52
7.3.4.-	Casos de carga	53
7.4.-	<i>Cálculo de cargas y distancias</i>	<i>54</i>
7.5.-	<i>Cálculo de cargas por elemento.....</i>	<i>57</i>
7.5.1.-	Cálculo de cargas por elemento sobre la pluma	57
7.5.2.-	Cálculo de cargas por elemento sobre el cradle	62
7.5.3.-	Cálculo de cargas por elemento sobre la base y la torre	73
7.6.-	<i>Cálculo del número de ruedas de apoyo</i>	<i>77</i>
8.	Cálculo estructural en Robot	81
8.1.-	<i>Criterios de diseño.....</i>	<i>81</i>
8.2.-	<i>Modelado de la estructura.....</i>	<i>83</i>
8.3.-	<i>Modelado alámbrico de la pluma</i>	<i>84</i>
8.3.1.-	Cálculo estático lineal.....	87
8.3.1.1.-	Pluma extendida	87
8.3.1.2.-	Pluma retraída.....	90
8.3.2.-	Cálculo a pandeo lineal	93
8.3.2.1.-	Pluma extendida	93
8.3.2.2.-	Pluma retraída.....	96
8.4.-	<i>Modelado alámbrico del cradle</i>	<i>99</i>
8.4.1.-	Cálculo estático lineal.....	103
8.4.1.1.-	Pluma extendida	103
8.4.1.2.-	Pluma retraída.....	106
8.4.2.-	Cálculo a pandeo lineal	109
8.4.2.1.-	Pluma extendida	109
8.4.2.2.-	Pluma retraída.....	112
8.5.-	<i>Modelado alámbrico de la base y de la torre</i>	<i>115</i>
8.5.1.-	Cálculo estático lineal.....	118

8.5.1.1.- Pluma extendida	118
8.5.1.2.- Pluma retraída.....	122
8.5.2.- Cálculo a pandeo lineal	126
8.6.- <i>Modelo alámbrico del cargador</i>	127
8.6.1.- Cálculo estático	131
8.6.1.1.- Pluma extendida	131
8.6.1.2.- Pluma retraída.....	137
8.6.2.- Cálculo a pandeo lineal	141
8.6.2.1.- Pluma extendida	141
8.6.2.2.- Pluma retraída.....	144
8.7.- <i>Cuadro de cargas</i>	147
9. Cálculo y selección de los accionamientos	150
9.1.- <i>Cálculo del mecanismo de traslación</i>	150
9.1.1.- Cargador en servicio.....	151
9.1.2.- Cargador fuera de servicio	155
9.2.- <i>Cálculo del mecanismo de giro</i>	156
9.2.1.- Cargador en servicio.....	157
9.2.2.- Cargador fuera de servicio	160
10. Cálculo y selección de los anclajes de la torre	162
10.1.- <i>Cálculo de la carga resultante y su ubicación</i>	162
10.2.- <i>Cálculo de los anclajes de la torre</i>	163
11. Modelado tridimensional en SolidWorks	166
11.1.- <i>Modelado de la pluma</i>	166
11.1.1.- Diseño definitivo	166
11.1.2.- Generación del modelo CAD	167
11.2.- <i>Modelado del cradle</i>	168
11.2.1.- Diseño definitivo	168
11.2.2.- Generación del modelo CAD	169
11.3.- <i>Modelado de la base y la torre</i>	172
11.3.1.- Diseño definitivo	172
11.3.2.- Generación del modelo CAD	173
12. Análisis mediante el método de los elementos finitos en ANSYS	174

12.1.-	<i>Análisis de la pluma</i>	176
12.1.1.-	Preprocesamiento	176
12.1.2.-	Cargas por nudo	179
12.1.3.-	Solución	181
12.1.4.-	Postprocesamiento del cálculo estático lineal	185
12.1.5.-	Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal.....	200
12.2.-	<i>Análisis del cradle</i>	203
12.2.1.-	Preprocesamiento	203
12.2.2.-	Cargas por nudo	206
12.2.3.-	Solución	210
12.2.4.-	Postprocesamiento del cálculo estático lineal	214
12.2.5.-	Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal.....	229
12.3.-	<i>Análisis de la base y la torre</i>	232
12.3.1.-	Preprocesamiento	232
12.3.2.-	Cargas por nudo	235
12.3.3.-	Solución	238
12.3.4.-	Postprocesamiento del cálculo estático lineal	242
12.3.5.-	Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal.....	256
13.	Planificación	260
13.1.-	<i>Etapas del proyecto</i>	260
13.2.-	<i>Programación temporal</i>	262
14.	Presupuesto	263
15.	Conclusiones	264
16.	Bibliografía	267

1. Objeto y alcance del proyecto

El principal objetivo del presente proyecto es el diseño, cálculo y optimización de un sistema automático de carga de barcas de 10000 toneladas mediante cargador polar. El proyecto será llevado a cabo por la empresa PHB Weserhütte S.A.U. (actualmente perteneciente al Grupo TSK) y tiene su origen en la petición por parte de la empresa Fluor para el desarrollo de un sistema de triturado, manipulación y carga de coque procedente de una refinería en el puerto de Rotterdam.

La realización del proyecto conllevará, en términos generales, un análisis del sector actual y de las especificaciones impuestas por el cliente, el cálculo de la cinta transportadora del cargador y el predimensionamiento del mismo a partir de un modelo alámbrico. Finalmente, se llevará a cabo el dimensionamiento definitivo del cargador a partir de un modelo tridimensional analizado mediante el método de los elementos finitos, una de las herramientas más eficaces en el campo del diseño y análisis estructural.

El estudio desarrollado a lo largo del proyecto se lleva a cabo dentro del marco de colaboración entre la empresa PHB Weserhütte S.A.U. y el Área de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (Universidad de Oviedo).

2. Introducción al manejo de material a granel

Desde la antigüedad, el ser humano se ha enfrentado a la necesidad del almacenamiento y transporte de materiales, desde cultivos destinados a la alimentación hasta minerales empleados a nivel industrial.

En la actualidad, el manejo de material a granel es un sector de la ingeniería centrado en el diseño de equipos destinados al transporte de grandes cantidades de material desde uno o varios puntos hasta su destino final. Para ello, suelen emplearse elementos móviles de maquinaria como pueden ser las cintas transportadoras o los elevadores de cangilones.



Figura 2.1 – Cintas transportadoras empleadas como medio de transporte de material a granel [1]

Los sistemas de manejo de material a granel son habituales en aplicaciones de minería, portuarias e industrias de procesamiento.

3. Cargadores de barcos

Un cargador de barcos (*shiploader*) consiste en una máquina de gran tamaño utilizada para la carga de grandes cantidades de material sólido (como puede ser mineral de hierro, carbón, fertilizantes, grano...) en los denominados barcos de transporte.



Figura 3.1 – Cargador de barcos para mineral de hierro en Australia Occidental

De forma general, un cargador de barcos está constituido por un brazo extensible o (*boom*) que permite alcanzar todo el ancho de la bodega y adaptarse a distintos tipos de nave aumentando el tiro durante la carga. La carga del material se realiza a través de una tolva telescópica.

3.1.- TIPOS DE BARCOS DE TRANSPORTE

Los barcos de transporte pueden clasificarse en función de su capacidad de desplazamiento de agua, parámetro expresado en DWT (*Dead Weight Tons*) que equivale a 1,0163 toneladas métricas. La lista inferior incluye una breve descripción de los principales tipos de barcos de transporte:

- **Handysize.** Barcos de transporte con la menor capacidad de desplazamiento de agua, comprendida entre 10000 y 39999 DWT.



Figura 3.2 – Barco de transporte Handysize

- **Handymax.** Barcos de transporte con una capacidad de desplazamiento de agua superior, comprendida entre 40000 y 59999 DWT.



Figura 3.3 – Barco de transporte Handymax [2]

- **Panamax.** Barcos de transporte cuyo diseño permite atravesar el canal de Panamá, con una capacidad de desplazamiento de agua comprendida entre 60000 y 79999 DWT.



Figura 3.4 - Barco de transporte Panamax

- **Capesize.** Barcos de transporte con la mayor capacidad de desplazamiento de agua, comprendida entre 80000 y 365000 DWT. Estos barcos no pueden atravesar el canal de Panamá.



Figura 3.5 - Barco de transporte Capesize [2]

En algunas ocasiones, como es el caso del presente proyecto, se emplean barcazas en lugar de barcos de transporte. Una barcaza es un artefacto naval de fondo plano y sin impulsión propia empleado en el transporte fluvial o marítimo de mercancías. La imagen inferior muestra una barcaza destinada a la carga a granel:



Figura 3.6 – Barcaza de carga a granel [3]

3.2.- TIPOS DE CARGADORES DE BARCOS

En la actualidad, existen innumerables tipos de cargadores de barcos. A lo largo del presente apartado se describirán los principales tipos en función de su disposición y grados de libertad:

- **Cargadores fijos (*fixed shiploaders*).** Cargadores de barcos constituidos por una pluma telescópica y elevable.



Figura 3.7 - Cargador fijo [4]

- **Cargadores polares (*polar shiploaders*).** Cargadores de barcos constituidos por una pluma que permite un movimiento telescópico, de elevación y de giro.



Figura 3.8 - Cargador polar

- **Cargadores polares gemelos (*twin polar shiploaders*).** Cargadores de barcos consistentes en una combinación de dos o más cargadores polares.



Figura 3.9 - Cargadores polares gemelos [5]

- Cargadores de traslación (*travelling shiploaders*).** Cargadores de barcos que permiten su desplazamiento a lo largo del muelle. Además de este movimiento de traslación del cargador, la pluma permite realizar movimientos telescópicos, de elevación y de giro. Las combinaciones de movimiento más habituales son elevación-retracción, elevación-giro y elevación-retracción-giro.



Figura 3.10 - Cargador de traslación [6]

- Cargadores circulares (*radial or quadrant shiploaders*).** Cargadores de barcos constituidos por un puente de luz fija que permiten el desplazamiento del cargador a través del giro sobre un carril curvo, junto al movimiento telescópico de la pluma.

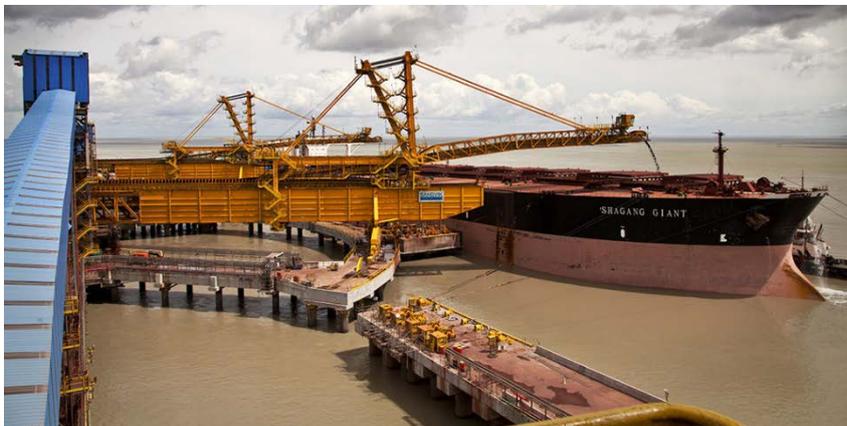


Figura 3.11 - Cargador circular [7]

- **Cargadores circulares lineales (*quadrant lineal shiploaders*).** Cargadores de barcos constituidos por un puente de luz variable que permiten el desplazamiento del cargador a través del giro sobre un carril lineal, junto al movimiento telescópico de la pluma.



Figura 3.12 - Cargador circular lineal [8]

- **Cargadores de doble giro orbital (*dual orbiting slewing shiploaders*).** Cargadores de barcos constituidos por dos puentes de luz fija que permiten el desplazamiento de dos cargadores a través del giro sobre dos carriles curvos perpendiculares a la línea de muelle, junto al movimiento telescópico de cada pluma.



Figura 3.13 - Cargadores de doble giro orbital [9]

3.3.- CARGADORES POLARES

Como ya se comentó anteriormente, los cargadores polares están constituidos por un brazo o pluma que permite el movimiento telescópico, de elevación y de giro. Esto es posible gracias a la existencia de un punto pivotante sobre una plataforma y una serie de accionamientos. La imagen inferior muestra una representación esquemática de un cargador polar:

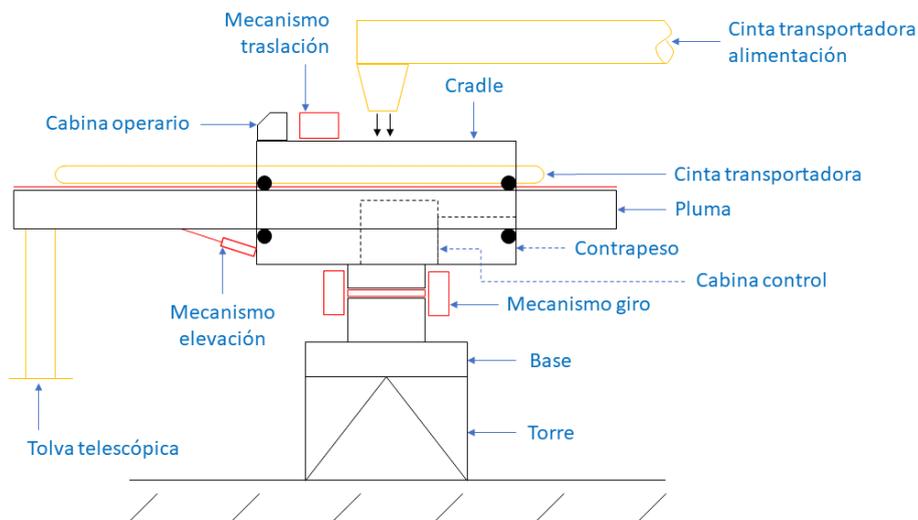


Figura 3.14 - Representación esquemática de un cargador polar

A continuación, se incluye una descripción estructural de este tipo de cargadores:

- **Torre.** Elemento estructural que mantiene el cargador en una posición elevada, da soporte a la base y transmite los esfuerzos a través de la cimentación.
- **Base.** Infraestructura del cargador de barcos. Funciona como estructura de soporte del mecanismo de giro y del resto de elementos superiores.
- **Mecanismo de giro.** Mecanismo que permite el movimiento de giro del cargador. Consiste en un engranaje planetario que gira sobre un rodamiento axial. Para ello, habitualmente se emplean tres motores, siendo posible llevar a cabo el giro del cargador mediante dos de ellos.

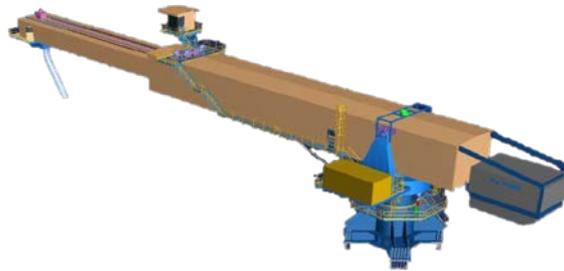
- **Mecanismo de elevación.** Mecanismo que permite la elevación del cargador. Consiste habitualmente en dos cilindros hidráulicos de doble efecto ubicados entre la base y el cradle, siendo posible soportar la totalidad del peso del brazo y de los componentes instalados sobre el mismo mediante un solo cilindro.
- **Cradle.** Celosía espacial que experimenta el movimiento de giro y de elevación y da soporte a la pluma. La pluma se desliza a través del interior del cradle gracias a un mecanismo de traslación y las ruedas de apoyo, las cuales sirven además como guía.
- **Contrapeso.** Grandes bloques de hormigón colocados sobre el cradle cuyo objetivo es lograr que la fuerza resultante caiga dentro de la proyección horizontal de la estructura portante. Puede tener una posición fija o ser móvil, en función de las necesidades del cargador.
- **Cinta transportadora de alimentación.** Cinta transportadora contenida en una galería elevada superior al cradle. Al final de esta se encuentra una tolva que vierte el producto sobre la cinta transportadora de la pluma.
- **Mecanismo de traslación.** Mecanismo que permite el avance o retroceso de la pluma. Consiste en un mecanismo piñón-cremallera con transmisión por cadena. Habitualmente se emplean dos motores ubicados en la parte superior del cradle y dos cadenas en la parte superior de la pluma, siendo necesario únicamente uno de los motores para llevar a cabo dicho movimiento de traslación.
- **Pluma.** Brazo extensible que experimenta el movimiento de traslación y da soporte a la cinta transportadora y a la tolva telescópica. Su extremo será capaz de alcanzar los distintos puntos de la barcaza.
- **Cinta transportadora.** Sistema de transporte continuo formado por una banda que se mueve entre dos tambores. Su función es transportar el producto hasta la tolva telescópica situada en el extremo de la pluma.
- **Tolva telescópica.** Tolva equipada con un mecanismo que permite el movimiento telescópico de la misma para regular la altura de carga del producto sobre la barcaza.

- **Pasarelas.** Estructuras consistentes en escaleras, pasarelas de rejilla de acero, barandillas y protecciones que permiten el acceso a distintos puntos del cargador para llevar a cabo las tareas de inspección y mantenimiento. Es habitual encontrarlas sobre la base, el cradle y la pluma.
- **Cabina de control.** Equipos eléctricos, electrónicos y de control necesarios para gobernar el funcionamiento del cargador. Habitualmente se encuentra fijado a uno de los lados del cradle.
- **Cabina del operario.** Cabina de mando del operador de la máquina desde la cual se controlan los movimientos del cargador. Habitualmente se encuentra en la parte superior del cradle en una posición predominante.

En la actualidad, es posible encontrar múltiples empresas que llevan a cabo proyectos de cargadores de barcos. La siguiente lista incluye una breve descripción de proyectos de cargadores polares llevados a cabo por algunos de los principales fabricantes:

- **PHB Weserhütte S.A.U. (Grupo TSK).** La compañía PHB Weserhütte S.A.U., perteneciente al Grupo TSK, actualmente (2018) está llevando a cabo el suministro completo de un cargador de buques para el cliente Minera Panamá S.A. Dicho cargador tiene una capacidad de 1600 toneladas por hora y consta de un brazo telescópico para el concentrado de cobre en el Puerto Internacional de Punta Rincón, Panamá.

Modelo tridimensional del cargador



Base del cargador



Pluma y cradle del cargador



Figura 3.15 -Cargador polar de PHB Weserhütte S.A.U. (Grupo TSK) en Punta Rincón, Panamá

- **Agrico Sales.** Agrico Sales diseñó, suministró y supervisó la instalación completa de una terminal de grano en Ventspils, Letonia. Finalizado en el verano de 2005, este puerto del Mar Báltico recibe vagones de grano de Kazajstán, almacena hasta 73000 mt de grano y carga Panamax o embarcaciones de menor tamaño a 1500 mtph. Se prevé que el rendimiento anual alcance los 2,5 millones de toneladas métricas. El diseño de Agrico incluye consideraciones medioambientales y puede ampliarse fácilmente en un futuro.



Figura 3.16 - Cargadores polares gemelos de Agrico Sales en Ventspils, Letonia [5]

- **Bedeschi.** A finales de diciembre de 2016, Bedeschi realizó con éxito la puesta en servicio de un cargador polar de tres torres con una capacidad de diseño de 6000 toneladas por hora para proporcionar carga a embarcaciones desde 50000 DWT hasta 180000 DWT. La terminal de carbón de Convent Marine Terminal (CMT) se encuentra en el río Mississippi, próximo a Convent (Louisiana) y es propiedad de SunCoke Energy desde 2015.



Figura 3.17 – Cargadores polares gemelos de Bedeschi en Convent, Louisiana [10]

- **FAM Engineering.** FAM suministró por orden de Portuaria Otway Ltd. un terminal de carbón para la compañía Minera Isla Riesco en el sur de Chile. La instalación está compuesta de dos cargadores de barcos con una capacidad de carga de 3000 tph para barcos de hasta 140000 DWT. Ocho grandes módulos de construcción que constituyen el sistema de carga para barcos fueron premontados en Alemania y luego transportados en barco a Chile. El montaje in situ se realizó mediante grúas de barco.



Figura 3.18 - Cargadores polares gemelos de FAM Engineering en la Isla Riesco, Chile [11]

Otros de los principales fabricantes destacados por llevar a cabo proyectos de cargadores de barcos podrían ser Telestack Ports and Terminals, Bruks Siwertell, Thyssenkrupp, Tenova o Sandvik.

4. Especificaciones impuestas por el cliente

El presente proyecto tiene su origen en una petición por parte de la empresa Fluor para el desarrollo de un sistema de triturado, manipulación y carga de coque procedente de una refinería en el puerto de Rotterdam.

Las imágenes inferiores muestran la trituradora, el sistema de transporte mediante cintas transportadoras y el sistema de carga mediante cargador polar solicitados por el cliente:

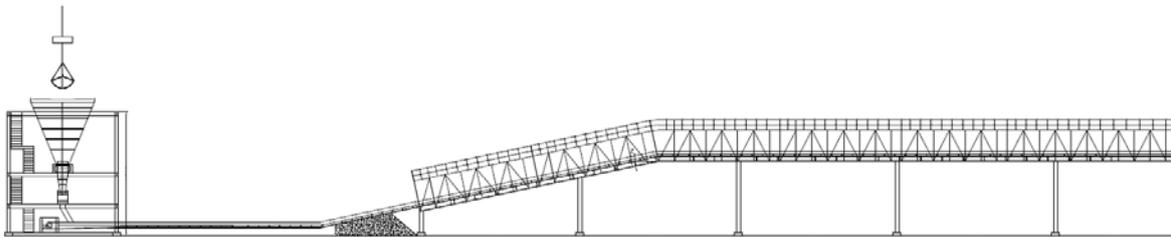


Figura 4.1 - Trituradora y cinta transportadora de coque

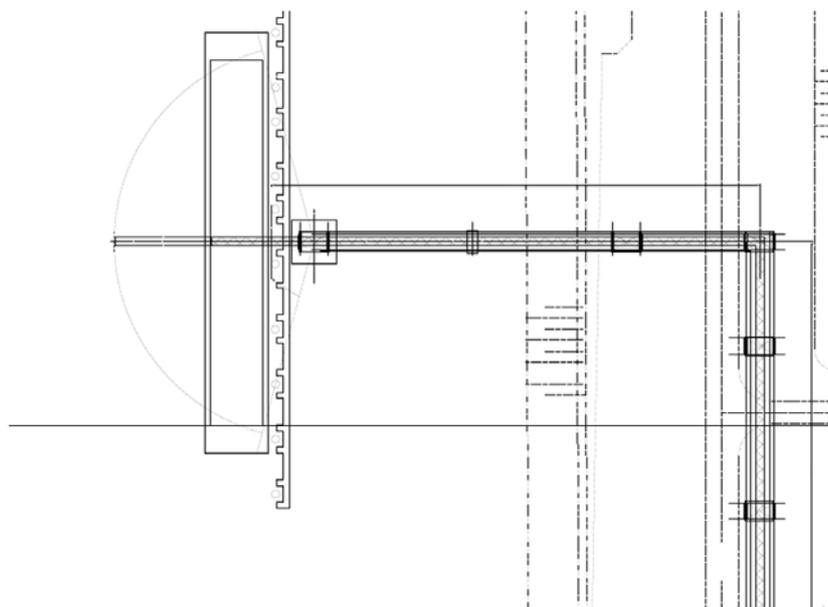


Figura 4.2 - Cinta transportadora y cargador polar de coque

A continuación, se recogen las principales especificaciones impuestas por la empresa Fluor en el documento de petición de material:

Condiciones de emplazamiento y diseño

- Localización: Rotterdam, The Netherlands
- Temperatura ambiente de diseño: -15 a +27 °C
- Máxima velocidad del viento: 35 m/s
- Dirección del viento predominante: SW 14 % del tiempo
- Zona sísmica: no aplicable
- Carga de nieve: 50 kg/m²

Propiedades del producto

- Producto: coque de petróleo
- Temperatura: 93 °C
- Densidad mínima/máxima: 720/1040 kg/m³
- Ángulo de talud dinámico: 35 a 40 °
- Tamaño nominal de partícula tras trituradora: 50 mm

Proceso

- Capacidad nominal/máxima: 280/370 mtp/h

Cintas transportadoras

- Cintas transportadoras dimensionadas para la capacidad máxima, un grado de llenado del 85 % y la densidad de producto mínima
- Diseño estructural basado en un grado de llenado del 100 % y la densidad de producto máxima
- Bandas con el mismo ancho, espesor y material a lo largo de todo el sistema
- Bandas resistentes al fuego y recubrimiento superior e inferior aislante
- Flecha máxima entre rodillos: 2 %
- Cintas transportadoras completamente cubiertas con capuchas retráctiles para inspección y mantenimiento
- Cintas transportadoras accesibles desde ambos lados por plataformas
- Rascadores de banda ajustables

Sistema de carga de barcazas

- El sistema de carga de barcazas debe ser fijo y permitir el movimiento de giro
- La pluma debe permitir el movimiento telescópico y de giro para abarcar todo el ancho y largo de la barcaza sin necesidad de mover la misma
- El cargador de barcos debe incluir pasarelas para las tareas de mantenimiento
- Debe incluirse una tolva telescópica automática para cargar el producto desde una altura máxima de 2 m respecto al fondo vacío de la barcaza

Accionamientos

- Los accionamientos deben de tener un factor de servicio de 1,15
- Alimentación 400V/230V 50 Hz

5. Diseño de la instalación

El diseño de la instalación partirá de un diseño preliminar, el cual irá experimentando diferentes cambios durante un proceso iterativo hasta alcanzar el diseño definitivo. Ambas cuestiones son descritas en el presente capítulo.

Tal y como se observará a lo largo del proyecto, el diseño de la instalación pasará por dos etapas: el predimensionamiento de la máquina a partir de un modelo alámbrico y el dimensionamiento definitivo de la misma a partir de un análisis mediante el método de los elementos finitos.

5.1.- DISEÑO PRELIMINAR

En primer lugar, se llevó a cabo el diseño preliminar del sistema de carga de coque sobre la barcaza “*Europe II*” del puerto de Rotterdam.

A partir de una determinada estación intermedia del sistema de transporte, se llevará el coque a través de una cinta transportadora de alimentación hasta una tolva destinada al vertido del producto sobre el cargador de barcos. Esta cinta transportadora estará encerrada en una galería elevada, sustentada mediante un pilar y dos cables.

El cargador de barcos diseñado será de tipo polar y no requerirá mecanismo de elevación. Su funcionamiento se basará en el movimiento relativo de traslación entre la pluma y el cradle y en el movimiento de giro del cradle sobre la estructura portante.

Finalmente, el coque circulará por una cinta transportadora situada sobre la pluma hasta alcanzar una tolva telescópica situada en el extremo, la cual se encargará de cargar el producto sobre la barcaza.

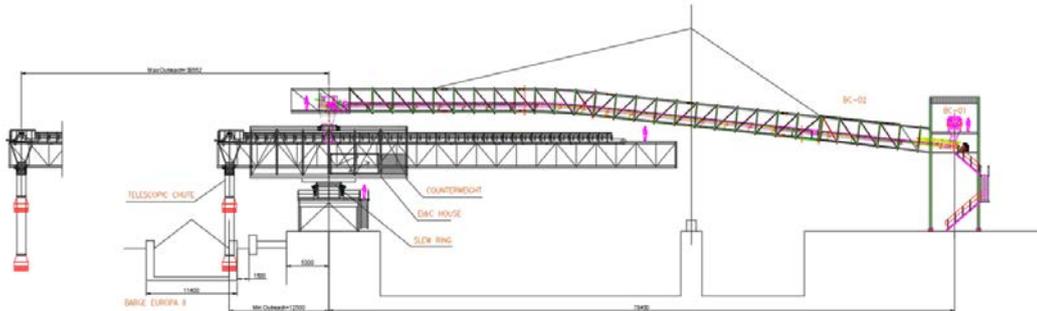


Figura 5.1 - Sistema de carga de coque sobre la barcaza "Europe II" (perfil)

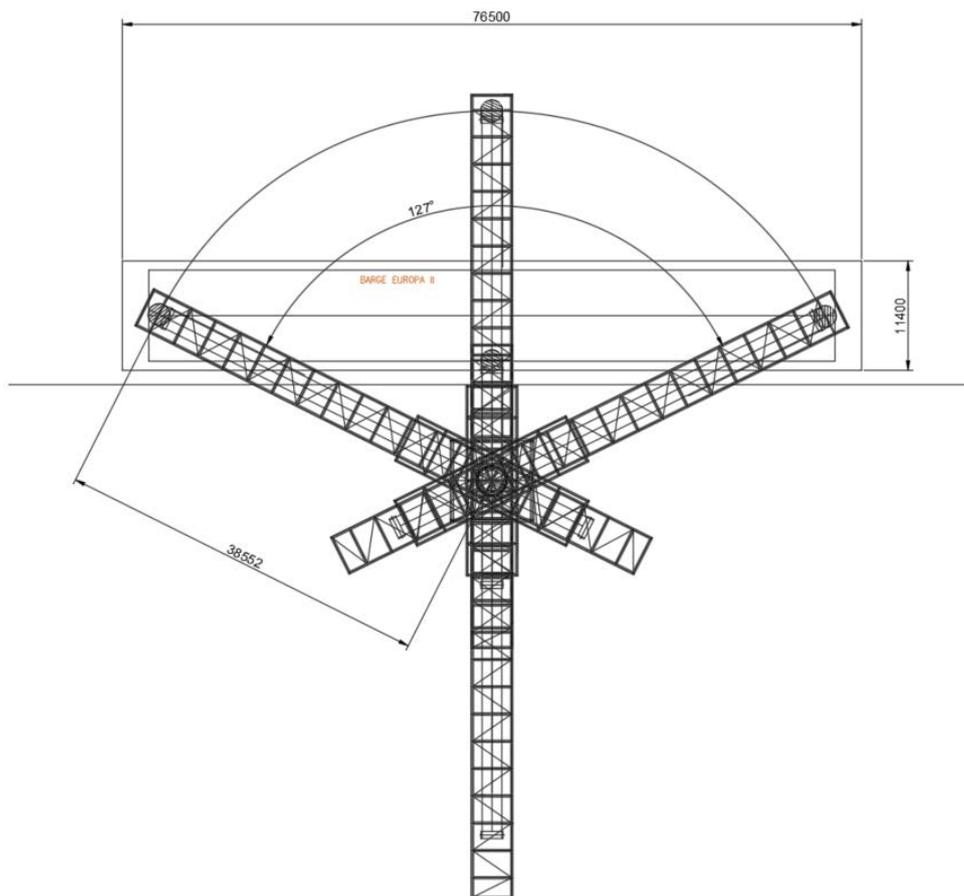


Figura 5.2 - Sistema de carga de coque sobre la barcaza "Europe II" (planta)

Tal y como se puede observar en las figuras anteriores, la pluma tiene un alcance máximo de 38552 mm y un alcance mínimo de 12500 mm, que junto a la posibilidad de describir un arco de 127° permite alcanzar cualquier punto contenido dentro de la superficie de la barcaza.

Por otro lado, se comprobó que las dimensiones seleccionadas en cada caso evitaran cualquier tipo de interferencia (entre la pluma y la galería elevada de la cinta transportadora o el pilar de sustentación) y permitieran el acceso de un operario para llevar a cabo las labores de inspección y mantenimiento oportunas (acceso a la base, pluma, galería elevada y estación intermedia).

Para una información más detallada, consultar el documento *Planos*.

5.2.- PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño del cargador de barcos pasó por distintas etapas, las cuales son resumidas a continuación:

- En primer lugar, se partió de las dimensiones y geometría especificadas en los planos generados durante el diseño preliminar. Empleando los perfiles adecuados, se comprobó que la estructura es capaz de resistir las cargas a las que está sometida. Sin embargo, resulta interesante analizar otros diseños para tratar de optimizar el modelo del cargador.
- A continuación, se analizó el cargador contemplando dos situaciones distintas: una pluma de sección cuadrada y una pluma de sección triangular, empleando dimensiones normalizadas para definir la estructura en ambos casos. Se comprobó que para soportar las cargas a las que está sometida, la pluma de sección cuadrada resulta finalmente más ligera que la pluma de sección triangular.

- Finalmente, se generó el diseño de detalle del cargador para el caso de la pluma de sección cuadrada, optimizando las dimensiones, el peso estructural, las deformaciones y las tensiones experimentadas por el mismo.

Las cargas a las que está sometido el cargador dependen de la geometría y del peso de los distintos elementos estructurales, así como otros componentes dispuestos sobre los anteriores. Algunos de estos datos varían con cada diseño o incluso no se conocen hasta alcanzar el diseño definitivo. Por ello, el proceso de diseño del cargador consiste en un proceso iterativo que pasa por las siguientes fases hasta alcanzar una solución de compromiso:

- Generación de los planos del cargador
- Cálculo y optimización de la cinta transportadora
- Cálculo de las cargas
- Cálculo estructural y optimización de la pluma
- Cálculo estructural y optimización del cradle que soporta la pluma
- Cálculo estructural y optimización de la base y de la torre que soportan el cradle
- Cálculo del número de ruedas de apoyo de la pluma sobre el cradle
- Cálculo y selección de los accionamientos de traslación y de giro
- Cálculo y selección de los anclajes de la torre
- Vuelta a la generación de los planos del cargador

Los planos definitivos pueden consultarse en el documento *Planos*. Las líneas punteadas marcadas en azul representan la geometría del cargador de acuerdo al diseño alámbrico, mientras que las líneas continuas marcadas en negro representan la geometría real del cargador (conocida una vez finalizado el análisis mediante el método de los elementos finitos).

6. Cálculo de la cinta transportadora

El primer paso consistirá en el cálculo de la cinta transportadora situada sobre la pluma del cargador. Se llevarán a cabo un cálculo simplificado y un cálculo completo de la cinta, desarrollando ambos tanto de forma manual, como a través de un software específico. Adicionalmente, se realizará un segundo cálculo computerizado de la cinta a través del software de diseño de bandas transportadoras BeltStat.

6.1.- CÁLCULO MANUAL DE LA CINTA TRANSPORTADORA

Los datos empleados para llevar a cabo el cálculo de la cinta transportadora fueron obtenidos a partir de distintas fuentes:

- Especificaciones impuestas por el cliente
- Planos generados durante la fase de diseño preliminar
- Valores estandarizados extraídos de libros [12] o catálogos [13] [14]
- Valores o consideraciones basados en la experiencia

La tabla inferior recoge la totalidad de los datos empleados durante el cálculo, organizados en diferentes secciones:

DATOS	
Instalación	
Capacidad	370 mtph
Grado de llenado	85 %
Longitud total	48,599 m
Longitud impacto	1,5 m

Longitud producto	38,552 m
Desnivel	0 m
Ángulo instalación	0 °
Producto (Coke)	
Densidad producto	720 kg/m ³
Tamaño producto	50 mm
Ángulo talud dinámico	35-40 °
Grupo motriz	
Situación	Cabeza
Rozamiento banda-tambor	0,4
Ángulo abrazado	3,1415 rad
Rendimiento	0,85
Rodillos	
Ángulo artesa	35 °
Flecha entre rodillos	2 %
Ángulo de pinzaje	2 °
Rodillos portantes	
Separación	1,2 m
Número rodillos/estación	3
Longitud	315 mm
Diámetro	108 mm
Peso/estación	13,5 kg
Rodillos retorno	
Separación	3 m
Número rodillos/estación	1
Longitud	950 mm
Diámetro	108 mm
Peso/estación	10 kg
Rodillos impacto	
Separación	0,3 m
Número rodillos/estación	3
Longitud	315 mm
Diámetro	89 mm
Peso/estación	19,5 kg
Banda textil 3 EP 160/65	
Resistencia	500 kg/cm
Peso	4,5 kg/m ²
Recubrimiento superior	5 mm

Recubrimiento inferior	3 mm
Espesor/capa	1,3 mm
Número de capas	3
Espesor	3,9 mm
Rozamiento rascador-banda	1000 W
Tambor	
Diámetro	0,5 m
Longitud	0,95 m
Volumen	0,1865 m ³
Densidad	7850 kg/m ³
Peso	1464,28 kg

Tabla 6.1 - Datos de partida para el cálculo de la cinta transportadora

Como se puede observar, se considera la pluma totalmente extendida en el cálculo, situación en la que la cantidad de producto transportada es máxima.

Los cálculos desarrollados a lo largo de los apartados posteriores fueron realizados de acuerdo a la norma UNE 58-204-92 [15].

6.1.1.- Cálculo de la velocidad y del ancho de banda

En primer lugar, será necesario calcular la velocidad y el ancho de banda. Para ello, se supondrá un ancho de banda de 800 mm, un ángulo de artesa de 35 °, un ángulo de sobrecarga de unos 15 ° y una velocidad de banda de 1 m/s. La capacidad de la cinta transportadora para estos datos resulta ser de:

$$Q_{V_1} = 258 \frac{m^3}{h} \quad (6.1)$$

La capacidad volumétrica real de la cinta tiene un valor de:

$$Q_V = \frac{370}{\frac{720}{1000}} = 513,89 \frac{m^3}{h} \quad (6.2)$$

Teniendo en cuenta el coeficiente de reducción por inclinación, la velocidad de la banda resulta:

$$v = \frac{Q_V}{Q_{V_1} \cdot K} = \frac{513,89}{258 \cdot 1} = 1,99 \frac{m}{s} \quad (6.3)$$

Por tanto, se elegirá en principio el valor normalizado de 2,09 m/s. Si se recalcula ahora el valor de la capacidad volumétrica:

$$Q_V = 2,09 \cdot 258 = 539,22 \frac{m^3}{h} \quad (6.4)$$

En estas condiciones, el grado de llenado toma un valor de:

$$\text{Grado de llenado} = \frac{513,89}{539,22} = 95 \% \quad (6.5)$$

El valor anterior resulta ser muy elevado respecto al valor del 85 % requerido por el cliente. Una opción para reducir el grado de llenado consiste en aumentar la velocidad de la banda.

Si se considera ahora un ancho de banda de 800 mm, una capacidad de 258 m³/h y una velocidad de banda normalizada de 2,62 m/s, es posible recalcular el valor de la capacidad volumétrica real:

$$Q_V = 2,62 \cdot 258 \cdot 1 = 675,96 \frac{m^3}{s} \quad (6.6)$$

De esta forma, el grado de llenado de la cinta resulta ser de:

$$\text{Grado de llenado} = \frac{513,89}{675,96} = 76 \% \quad (6.7)$$

En estas condiciones, el valor del grado de llenado es adecuado. Si se considerara una velocidad de banda no normalizada e inferior a 2,62 m/s, se lograría un grado de llenado más cercano al 85 %.

A partir de los datos anteriores, se obtiene una sección transversal del producto a transportar de 0,0716 m² aproximadamente. De esta forma, la capacidad máxima de la cinta tendría un valor de:

$$Q_{max} = 3600 \cdot 0,0716 \cdot 2,62 \cdot 1 \cdot \frac{720}{1000} = 487 \frac{t}{h} \quad (6.8)$$

Como se puede observar, este valor es superior a las 370 t/h requeridas por la instalación. Por tanto, los valores de velocidad y ancho de banda seleccionados serán de 2,62 m/s y 800 mm, respectivamente.

6.1.2.- Cálculo simplificado

A partir de la velocidad de la banda seleccionada y el diámetro del tambor, es posible calcular las revoluciones a las que debe trabajar el grupo motriz:

ANCHO DE BANDA Y VELOCIDAD	
Ancho banda (B)	800 mm
Velocidad banda (v)	2,62 m/s
Revoluciones grupo motriz	100,08 rpm

Tabla 6.2 - Ancho de banda y velocidad de trabajo

Teniendo en cuenta la tabla de datos inicial, el siguiente paso consistirá en el cálculo de los pesos por metro del producto a transportar, de los rodillos portantes, de retorno y de impacto y de la banda:

PESOS	
Producto	
Masa material (Qg)	39,23 kg/m
Rodillos	
Masa rodillos portantes (Qro)	11,25 kg/m
Masa rodillos retorno (Qru)	3,33 kg/m
Masa rodillos impacto (Qri)	65 kg/m
Banda	
Masa banda (Qb)	11,28 kg/m

Tabla 6.3 - Peso por metro del producto, rodillos y banda

Para el coeficiente ficticio de rozamiento y valores del coeficiente C indicados en la tabla inferior, es posible obtener las resistencias a la rodadura en los ramales superior e inferior, la fuerza de arrastre y la potencia necesaria:

RESISTENCIAS Y POTENCIA	
Coeficiente ficticio rozamiento (f)	0,025
Coeficiente C (L total)	2,3
Coeficiente C (L impacto)	5
Coeficiente C (L producto)	2,5
Resistencia ramal superior	169,67 kg
Resistencia ramal inferior	40,84 kg
Fuerza arrastre (Fu)	210,50 kg
Potencia	6,36 kW

Tabla 6.4 - Resistencias a la rodadura, fuerza de arrastre y potencia

Finalmente, se calculará el valor mínimo de la tensión en los ramales superior e inferior, el valor teórico de la tensión en cada tramo, el valor del contrapeso necesario y las tensiones reales en cada tramo:

TENSIONES	
Mínimas	
Tensión mínima ramal superior	303,05 kg
Tensión mínima ramal inferior	169,20 kg
Teóricas	
T1	294,25 kg
T2	83,75 kg
T4	124,58 kg
T3	124,58 kg
Contrapeso	
$\Delta T1$	8,80 kg
$\Delta T2$	85,45 kg
$\Delta T4$	178,47 kg
$\Delta T3$	44,62 kg
Peso contrapeso	524,43 kg

Reales	
T1	472,72 kg
T2	262,21 kg
T4	303,05 kg
T3	303,05 kg

Tabla 6.5 - Tensiones mínimas, teóricas y reales

Las tensiones recogidas en la tabla superior (así como las incluidas en el siguiente apartado) siguen la nomenclatura indicada en la siguiente imagen:

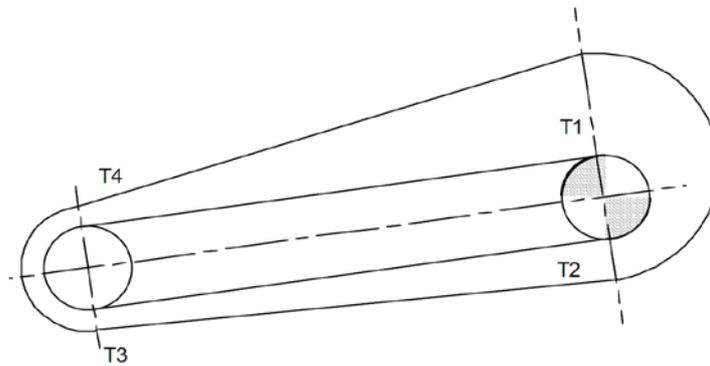


Figura 6.1 - Tensiones de una cinta transportadora con el accionamiento en cabeza

La cinta transportadora instalada sobre la pluma del cargador utilizará un mecanismo tensor por husillo en lugar de un contrapeso para simplificar el diseño. Por ello, el husillo deberá ser capaz de aumentar la tensión de la banda en un valor de 178,47 kg, lo cual se logra fácilmente con una carrera de 0,5 m (valor habitual en proyectos similares).

En estas condiciones, el coeficiente de seguridad de la banda seleccionada tiene el valor mostrado a continuación:

COEFICIENTE SEGURIDAD BANDA	
Coeficiente seguridad	84,62

Tabla 6.6 - Coeficiente de seguridad de la banda

6.1.3.- Cálculo completo

Para llevar a cabo el cálculo completo de la cinta transportadora, habrá que tener en cuenta las resistencias principales, las resistencias secundarias, las resistencias especiales y las resistencias debidas a la inclinación. En el caso del cálculo simplificado únicamente se consideraban las resistencias principales y debidas a la inclinación, quedando el resto englobadas dentro del coeficiente C, lo cual sólo es recomendable para instalaciones de gran longitud entre ejes (superior a 80 m).

El cálculo de las resistencias secundarias queda recogido en la tabla inferior, donde las variables representadas en color gris son datos necesarios para calcular dichas resistencias:

Resistencias secundarias (Fn)		
Resistencias inercia y rozamiento entre material y banda sobre punto de carga en zona de aceleración (Fba)	269,28	N
Resistencia rozamiento entre material y guías en zona de aceleración (Ft)	799,38	N
Resistencia enrollamiento banda armadura textil (F1)	24,71	N
Resistencia cojinetes ejes tambor (Ft)	1,31	N
Caudal transportado (lv)	102,78	kg/s
Componente velocidad alimentación de material en el sentido del transporte (vo)	0	m/s
Coeficiente rozamiento entre material y guía (μ_2)	0,7	
Aceleración gravedad (g)	9,81	m/s ²
Anchura banda entre guías (b1)	0,6	m
Longitud aceleración mínima (lb_min)	0,70	m
Coeficiente adherencia entre material y banda (μ_1)	0,5	
Ancho banda (B)	0,8	m
Tensión media banda (F)	335,26	N
Espesor banda (d)	0,0119	m
Diámetro tambor (D)	0,5	m
Diámetro eje accionamiento (do)	0,08	m
Suma vectorial tensiones banda y esfuerzos masa partes giratorias en un tambor (FT)	1638,36	N

Tabla 6.7 - Resistencias secundarias

El cálculo de las resistencias especiales queda recogido en la tabla inferior, donde las variables representadas en color gris son datos necesarios para calcular dichas resistencias:

Resistencias especiales (Fs)	
Resistencia convergencia rodillos (Fe)	144,55 N
Resistencia rozamiento entre material y guías laterales (Fgl)	0,62 N
Resistencia rozamiento limpiadores de banda (Fr)	381,68 N
Resistencia rozamiento faldones desviadores de derrame (Fa)	0 N
Factor artesa (Ce)	0,43
Coeficiente rozamiento entre banda y rodillos portantes (μ_0)	0,4
Longitud instalación rodillos portantes convergentes (Le)	48,599 m
Ángulo convergencia (E)	0,0349 rad
Base logaritmo neperiano ϵ	2,7183
Longitud transporte entre guías (l)	4 m
Superficie contacto entre banda y limpiador banda (A)	0,004 m ²
Presión entre limpiador y banda (p)	100000 N/m ²
Coeficiente rozamiento entre limpiador y banda (μ_3)	0,95
Factor raspado (ka)	1500 N/m

Tabla 6.8 - Resistencias especiales

De esta forma, el valor de los distintos tipos de resistencia, la fuerza de arrastre y la potencia son las indicadas en la siguiente tabla:

RESISTENCIAS Y POTENCIA	
Coeficiente ficticio rozamiento (f)	0,025
Coeficiente C (L total)	1
Coeficiente C (L impacto)	1
Coeficiente C (L producto)	1
Resistencia ramal superior	67,62 kg
Resistencia ramal inferior	17,75 kg
Resistencias secundarias (Fn)	111,59 kg
Resistencias especiales (Fs)	53,70 kg
Resistencias inclinación (Fst)	0 kg
Fuerza arrastre (Fu)	250,67 kg
Potencia	7,57 kW

Tabla 6.9 - Resistencias, fuerza de arrastre y potencia

Finalmente, se calculará el valor mínimo de la tensión en los ramales superior e inferior, el valor teórico de la tensión en cada tramo, el valor del contrapeso necesario y las tensiones reales en cada tramo:

TENSIONES	
Mínimas	
Tensión mínima ramal superior	303,05 kg
Tensión mínima ramal inferior	169,20 kg
Teóricas	
T1	350,39 kg
T2	99,72 kg
T4	157,71 kg
T3	157,71 kg
Contrapeso	
$\Delta T1$	-47,34 kg
$\Delta T2$	69,48 kg
$\Delta T4$	145,34 kg
$\Delta T3$	11,49 kg
Peso contrapeso	490,12 kg
Reales	
T1	495,73 kg
T2	245,06 kg
T4	303,05 kg
T3	303,05 kg

Tabla 6.10 - Tensiones mínimas, teóricas y reales

La cinta transportadora instalada sobre la pluma del cargador utilizará un mecanismo tensor por husillo en lugar de un contrapeso para simplificar el diseño. Por ello, el husillo deberá ser capaz de aumentar la tensión de la banda en un valor de 145,34 kg, lo cual se logra fácilmente con una carrera de 0,5 m (valor habitual en proyectos similares).

En estas condiciones, el coeficiente de seguridad de la banda seleccionada tiene el valor mostrado a continuación:

COEFICIENTE SEGURIDAD BANDA	
Coeficiente seguridad	80,69

Tabla 6.11 - Coeficiente de seguridad de la banda

6.2.- CÁLCULO COMPUTERIZADO DE LA CINTA TRANSPORTADORA

El cálculo computerizado de la cinta transportadora será realizado a través de un software específico desarrollado por la empresa PHB Weserhütte S.A.U..

La introducción de los datos en el programa se realizará a través de un cuestionario y los cálculos y resultados serán proporcionados de forma automática por el mismo.

Este programa permitirá llevar a cabo tanto un cálculo simplificado como un cálculo completo de la cinta.

6.2.1.- Cálculo simplificado

Los resultados proporcionados por el programa tras llevar a cabo el cálculo simplificado de la cinta transportadora pueden consultarse en el documento *Cálculos*.

Como se puede observar, el valor de la potencia necesaria obtenido es de 7 kW, muy cercano a los valores obtenidos durante el cálculo manual (6,36 kW en el caso del cálculo simplificado y 7,57 kW en el caso del cálculo completo).

6.2.2.- Cálculo completo

Los resultados proporcionados por el programa tras llevar a cabo el cálculo completo de la cinta transportadora pueden consultarse en el documento *Cálculos*.

Como se puede observar, el valor de la potencia necesaria obtenido es de 6,4 kW, muy cercano a los valores obtenidos durante el cálculo manual (6,36 kW en el caso del cálculo simplificado y 7,57 kW en el caso del cálculo completo). Particularmente, el programa empleado lleva a cabo el cálculo de la cinta transportadora mediante la utilización del coeficiente C, lo cual puede explicar la mayor similitud entre los resultados obtenidos en este apartado y en el cálculo manual simplificado.

Como conclusión, se instalará un único grupo de accionamiento con una potencia de 11 kW (valor de potencia normalizado, aproximadamente 1,5 veces superior al requerido de acuerdo a los cálculos).

Una opción válida sería la selección de un motorreductor IE3 NORD [16] de 11 kW de potencia, cuyas características se muestran en la siguiente imagen:

HELICAL BEVEL GEARS BLOCK SK 9042.1-160MP/4

IE3 / Premium Efficiency



Motor Power	11 kW	Ratio	27.91
Output Speed	52 1/min	Output Torque	2003 Nm
Service Factor	1.4	Overhung load	14 kN
Weight	198 kg	Axial Load	32.4 kN

Figura 6.2 - Motorreductor NORD seleccionado

Como se puede observar, el motorreductor de la imagen superior tiene un factor de servicio de valor 1,15, tal y como se indica en las especificaciones. La velocidad de salida, la relación de reducción y el número de polos son coherentes con las necesidades del sistema.

El accionamiento seleccionado se trata de una primera aproximación. En la práctica, resulta habitual seleccionar individualmente el motor, el reductor y el acoplamiento.

6.3.- CÁLCULO COMPUTERIZADO DE LA CINTA TRANSPORTADORA EN BELTSTAT

Adicionalmente, se llevará a cabo otro cálculo computerizado a través del software BeltStat v8 de Conveyor Dynamics, Inc. Para ello, se introducirán en el programa los datos de los que se disponga y este calculará los parámetros restantes y devolverá el informe de cálculo incluido en el documento *Cálculos*.

El software BeltStat trabaja según la norma CEMA en lugar de seguir la norma UNE [15] empleada en los cálculos manuales. Sin embargo, se han obtenido conclusiones idénticas a las alcanzadas en los cálculos previos: una potencia demandada de 7 kW y, por tanto, una potencia instalada de 11 kW.

7. Cálculo de las cargas

El presente capítulo recoge las distintas cargas a tener en cuenta en el diseño de estructuras según la Federación Europea de Manipulación de materiales (FEM) [17].

Posteriormente, se calculará el valor numérico de dichas cargas, las cargas a aplicar sobre los distintos elementos (nudos y barras) de un modelo alámbrico del cargador y el número de ruedas de apoyo de la pluma sobre el cradle necesarias.

7.1.- CARGAS SOBRE LA PLUMA

En primer lugar, se analizarán las cargas a considerar durante el diseño estructural de la pluma.

7.1.1.- Cargas principales

- **Peso propio.** Se considerará el peso propio de la pluma, el peso propio de la cinta transportadora (incluyendo los accionamientos y pasarelas), el peso propio de la tolva telescópica (incluyendo los accionamientos) y el peso propio de la cadena de traslación.
- **Peso del producto sobre la cinta transportadora.** Se calculará el peso del producto sobre la cinta transportadora a partir de la sección transversal del mismo, la longitud recorrida y la densidad máxima del material.
- **Peso del producto en la tolva telescópica.** Se calculará el peso del producto en la tolva telescópica a partir del volumen máximo de la misma y la densidad máxima del material.

- **Peso de la acumulación de suciedad en la pluma.** Se calculará el peso de la acumulación de suciedad en la pluma como un 10 % del peso del producto.
- **Tensión de la cinta transportadora.** Se considerarán las tensiones máximas obtenidas en cada tramo durante el cálculo de la cinta transportadora.

7.1.2.- Cargas adicionales

- **Carga de viento sobre la pluma.** La orientación de la pluma será variable en el tiempo, por lo que se considerarán cuatro posibles situaciones en las que el viento incidirá perpendicularmente sobre una superficie aproximada como sólida. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (función de la velocidad del viento), el área expuesta y un coeficiente de forma.
- **Carga de nieve sobre la pluma.** Se calculará la carga de nieve sobre la pluma a partir de la carga superficial y el área abarcada por la misma.
- **Sobrecarga de la pluma.** Se considerará una posible sobrecarga durante la operación o las tareas de inspección y mantenimiento de 250 kg/m^2 sobre las pasarelas de la pluma.

7.1.3.- Cargas especiales

- **Carga de bloqueo de la tolva telescópica.** Se calculará la carga de bloqueo de la tolva telescópica a partir del volumen máximo de la misma y la densidad máxima del material.
- **Carga de viento fuera de servicio sobre la pluma.** Como ya se indicó anteriormente, se considerarán cuatro posibles situaciones. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (considerando una velocidad del viento de tormenta de 50 m/s), el área expuesta y un coeficiente de forma.

7.1.4.- Casos de carga

Las cargas principales, adicionales y especiales mencionadas en los apartados anteriores serán combinadas para dar lugar a distintos casos de carga. La tabla inferior muestra los casos de carga considerados durante el cálculo estructural de la pluma:

	Caso I	Caso II				Caso III								Cargas durante el montaje			
	Cargas principales	Cargas principales y adicionales				Cargas principales, adicionales y especiales											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII
CARGAS PRINCIPALES																	
Peso de la pluma	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la cinta transportadora	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la tolva telescópica	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la cadena de traslación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso del producto sobre la cinta transportadora	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Peso del producto en la tolva telescópica	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Peso de la acumulación de suciedad sobre la pluma	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Tensión de la cinta transportadora	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
CARGAS ADICIONALES																	
Carga de viento sobre la pluma	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de nieve sobre la pluma	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sobrecarga de la pluma	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CARGAS ESPECIALES																	
Carga de bloqueo de la tolva telescópica	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de viento fuera de servicio sobre la pluma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 7.1 - Casos de carga a considerar sobre la pluma

Los casos de carga más desfavorables son aquellos que aparecen resaltados en azul en la tabla superior, por lo que el análisis de dichos casos cubrirá las distintas solicitaciones a las que puede estar sometida la pluma.

7.2.- CARGAS SOBRE EL CRADLE

En segundo lugar, se analizarán las cargas a considerar durante el diseño estructural del cradle.

En este caso, además de considerar las cargas que actúan sobre el cradle, será necesario tener en cuenta los esfuerzos producidos en el mismo debido a las cargas que actúan sobre la pluma.

7.2.1.- Cargas principales

- **Peso propio.** Se considerará el peso propio del cradle, el peso propio de las pasarelas del cradle, el peso propio de las ruedas de apoyo (incluyendo los *bogies*), el peso propio de la cabina del operario, el peso propio de la cabina de control, el peso propio del contrapeso, el peso propio de la cinta de alimentación (incluyendo la galería) y el peso propio del accionamiento de traslación. Además, se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle debidos al peso propio de la pluma, al peso propio de la cinta transportadora (incluyendo los accionamientos y pasarelas) y al peso propio de la tolva telescópica (incluyendo los accionamientos).
- **Peso del producto sobre la cinta transportadora.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por el peso del producto sobre la cinta transportadora.
- **Peso del producto en la tolva telescópica.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por el peso del producto en la tolva telescópica.
- **Peso del producto sobre la cinta de alimentación.** Se considerará un peso de 15 toneladas de producto transportado sobre la cinta de alimentación a través de la galería elevada.

- **Peso de la acumulación de suciedad en el cradle.** Se calculará el peso de la acumulación de suciedad en el cradle como un 10 % del peso del producto que atraviesa el mismo.
- **Peso de la acumulación de suciedad en la pluma.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por el peso de la acumulación de suciedad en la pluma.

7.2.2.- Cargas adicionales

- **Carga de viento sobre el cradle.** La orientación del cradle será variable en el tiempo, por lo que se considerarán cuatro posibles situaciones en las que el viento incidirá perpendicularmente sobre una superficie aproximada como sólida. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (función de la velocidad del viento), el área expuesta y un coeficiente de forma.
- **Carga de viento sobre la pluma.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por la carga de viento sobre la pluma.
- **Carga de viento sobre la cinta de alimentación.** Se considerarán los esfuerzos (fuerzas y momentos) producidos en el cradle por la carga de viento sobre la galería elevada. Para ello, será necesario el cálculo del centro de gravedad de la galería.
- **Carga de nieve sobre el cradle.** Se calculará la carga de nieve sobre el cradle a partir de la carga superficial y el área abarcada por el mismo.
- **Carga de nieve sobre la pluma.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por la carga de nieve sobre la pluma.
- **Sobrecarga del cradle.** Se considerará una posible sobrecarga durante la operación o las tareas de inspección y mantenimiento de 250 kg/m^2 sobre las pasarelas del cradle.
- **Sobrecarga de la pluma.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por la sobrecarga de la pluma.

7.2.3.- Cargas especiales

- **Carga de bloqueo de la tolva telescópica.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por la carga de bloqueo de la tolva telescópica.
- **Carga de viento fuera de servicio sobre el cradle.** Como ya se indicó anteriormente, se considerarán cuatro posibles situaciones. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (considerando una velocidad del viento de tormenta de 50 m/s), el área expuesta y un coeficiente de forma.
- **Carga de viento fuera de servicio sobre la pluma.** Se considerarán los esfuerzos producidos en el cradle por la carga de viento fuera de servicio sobre la pluma.
- **Carga de viento fuera de servicio sobre la cinta de alimentación.** Se considerarán los esfuerzos (esfuerzos y momentos) producidos en el cradle por la carga de viento fuera de servicio sobre la galería elevada. Para ello, será necesario el cálculo del centro de gravedad de la galería.

7.2.4.- Casos de carga

Las cargas principales, adicionales y especiales mencionadas en los apartados anteriores serán combinadas para dar lugar a distintos casos de carga. La tabla inferior muestra los casos de carga considerados durante el cálculo estructural del cradle:

	Caso I	Caso II				Caso III								Cargas durante el montaje			
	Cargas principales	Cargas principales y adicionales				Cargas principales, adicionales y especiales											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII
CARGAS PRINCIPALES																	
Peso del cradle	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de las pasarelas del cradle	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de las ruedas de apoyo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la cabina del operario	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Peso de la cabina de control	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso del contrapeso	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la cinta de alimentación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso del accionamiento de traslación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la pluma, cinta y tolva	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso del producto de la cinta y de la tolva	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Peso del producto de la cinta de alimentación	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Peso de la acumulación de suciedad sobre el cradle	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Peso de la acumulación de suciedad sobre la pluma	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
CARGAS ADICIONALES																
Carga de viento sobre el cradle	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de viento sobre la pluma	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de viento sobre la cinta de alimentación	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de nieve sobre el cradle	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Carga de nieve sobre la pluma	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sobrecarga del cradle	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sobrecarga de la pluma	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CARGAS ESPECIALES																
Carga de bloqueo de la tolva telescópica	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Carga de viento fuera de servicio sobre el cradle	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Carga de viento fuera de servicio sobre la pluma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
Carga de viento fuera de servicio sobre la cinta de alimentación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1

Tabla 7.2 - Casos de carga a considerar sobre el cradle

Los casos de carga más desfavorables son aquellos que aparecen resaltados en azul en la tabla superior, por lo que el análisis de dichos casos cubrirá las distintas solicitaciones a las que puede estar sometido el cradle.

7.3.- CARGAS SOBRE LA BASE Y LA TORRE

En tercer lugar, se analizarán las cargas a considerar durante el diseño estructural del cradle.

En este caso, además de considerar las cargas que actúan sobre la base y la torre, será necesario tener en cuenta los esfuerzos producidos en las mismas debido a las cargas que actúan sobre la pluma y el cradle.

Sin embargo, debido a la complejidad que supondría la modelización de dichas cargas frente a la facilidad que supone combinar distintos modelos individuales (modelo de la pluma, del cradle y de la base y la torre) en un único modelo global (modelo del cargador) en un programa de cálculo estructural alámbrico, se definirán únicamente aquellas que actúan sobre la base y la torre, quedando el resto consideradas en el modelo completo del cargador.

7.3.1.- Cargas principales

- **Peso propio.** Se considerará el peso propio de la base y de la torre, el peso propio de las pasarelas de la base y el peso propio del accionamiento de rotación (incluyendo piñones, corona y anillo).
- **Peso de la acumulación de suciedad en la base y la torre.** Se calculará el peso de la acumulación de suciedad en la base y la torre como un 10 % del peso del producto que las atraviesa.

7.3.2.- Cargas adicionales

- **Carga de viento sobre la base y la torre.** Se considerarán cuatro posibles situaciones en las que el viento incidirá perpendicularmente sobre una superficie aproximada como sólida. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (función de la velocidad del viento), el área expuesta y un coeficiente de forma.
- **Carga de nieve sobre la base.** Se calculará la carga de nieve sobre la base a partir de la carga superficial y el área abarcada por la misma.
- **Sobrecarga de la base.** Se considerará una posible sobrecarga durante la operación o las tareas de inspección y mantenimiento de 250 kg/m^2 sobre las pasarelas de la base.

7.3.3.- Cargas especiales

- **Carga de viento fuera de servicio sobre la base y la torre.** Como ya se indicó anteriormente, se considerarán cuatro posibles situaciones. La carga de viento será calculada a partir de la presión superficial (considerando una velocidad del viento de tormenta de 50 m/s), el área expuesta y un coeficiente de forma.

7.3.4.- Casos de carga

Las cargas principales, adicionales y especiales mencionadas en los apartados anteriores serán combinadas para dar lugar a distintos casos de carga. La tabla inferior muestra los casos de carga considerados durante el cálculo estructural de la base y la torre:

	Caso I	Caso II				Caso III				Cargas durante el montaje			
	Cargas principales	Cargas principales y adicionales				Cargas principales, adicionales y especiales							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
CARGAS PRINCIPALES													
Peso de la base y la torre	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de las pasarelas de la base	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso del accionamiento de rotación	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peso de la acumulación de suciedad sobre la base	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
CARGAS ADICIONALES													
Carga de viento sobre la base y la torre	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Carga de nieve sobre la base	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sobrecarga de la base	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CARGAS ESPECIALES													
Carga de viento fuera de servicio sobre la base y la torre	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 7.1 - Casos de carga a considerar sobre la base y la torre

Los casos de carga más desfavorables son aquellos que aparecen resaltados en azul en la tabla superior, por lo que el análisis de dichos casos cubrirá las distintas solicitaciones a las que pueden estar sometidas la base y la torre.

7.4.- CÁLCULO DE CARGAS Y DISTANCIAS

El siguiente paso consistirá en el cálculo de las cargas y de la distancia existente entre estas y el eje de giro del cargador. Para ello, se tendrán en cuenta los siguientes datos geométricos:

DATOS GEOMÉTRICOS	
Pluma	
Longitud	52,5 m
Altura	3,5 m
Ancho	5 m
Cradle	
Longitud	18 m
Altura	6,7 m
Ancho	6 m
Base y torre	
Lado	8 m
Altura	4 m
Producto cinta	
Longitud (pluma extendida)	38,552 m
Longitud (pluma retraída)	12,5 m
Sección 1	0,0385 m²
Sección 2	0,0353 m²
Densidad	1040 kg/m ³
Longitud rodillo central (I3)	0,315 m
Ancho de banda ocupado con producto (b)	0,6 m
Ángulo de artesa (λ)	0,6109 rad
Ángulo de talud dinámico (θ)	0,6545 rad
Producto tolva [18]	
Modelo referencia	NZO600DH
Diámetro	0,6 m
Longitud máxima	14,325 m
Volumen máximo	4,050 m ³
Densidad	1040 kg/m ³

Galería cinta alimentación	
Altura	3 m
Longitud 1	30 m
Longitud 2	50 m
Ángulo	10 °

Tabla 7.3 - Datos geométricos empleados en el cálculo de cargas y distancias

La sección del producto transportado sobre la cinta transportadora fue calculada de acuerdo a la norma. Los parámetros empleados para ello aparecen representados en la imagen inferior:

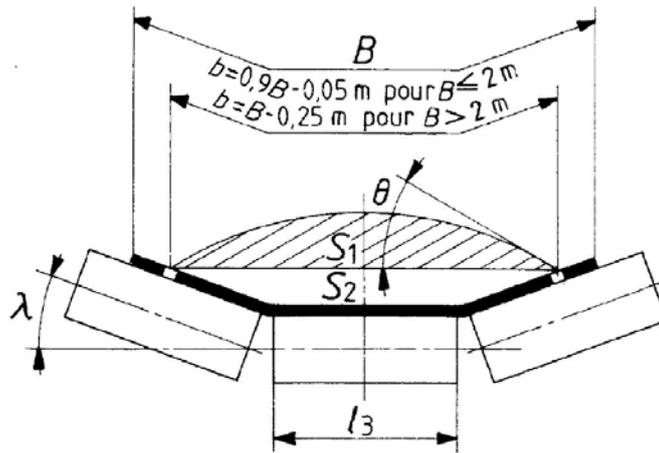


Figura 7.2 - Sección del producto transportado sobre una cinta transportadora

Tal y como se indicó anteriormente, el cálculo del centro de gravedad de la galería de la cinta de alimentación es necesario para la obtención de la carga de viento sobre la cinta de alimentación:

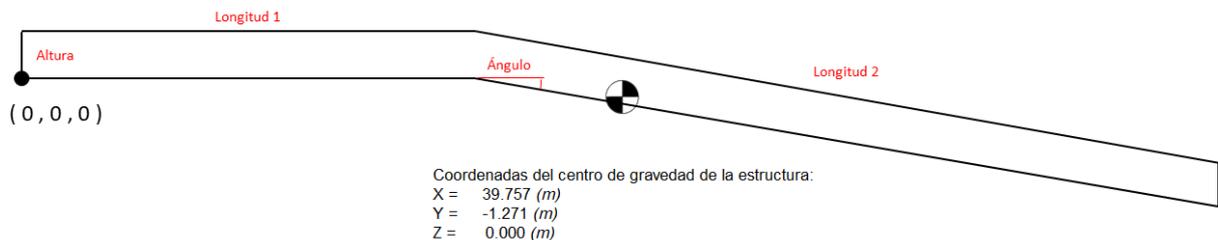


Figura 7.3 - Centro de gravedad de la galería de la cinta de alimentación

De acuerdo con lo establecido en los apartados anteriores y el conocimiento del peso de los distintos elementos es posible construir la tabla mostrada a continuación:

CARGAS Y DISTANCIAS	Pluma extendida		Pluma retraída	
Pluma	52598,69 kg	13,55 m	52598,69 kg	-12,50 m
Cinta transportadora (+ accionamientos y pasarelas)	11700,00 kg	13,55 m	11700,00 kg	-12,50 m
Tolva telescópica (+ accionamientos)	2800,00 kg	38,55 m	2800,00 kg	12,50 m
Cadena traslación	1575,00 kg	13,55 m	1575,00 kg	-12,50 m
Cradle	72801,76 kg	0,00 m	72801,76 kg	0,00 m
Pasarelas cradle	1440,00 kg	0,00 m	1440,00 kg	0,00 m
Ruedas apoyo (+ bogies)	25000,00 kg	0,00 m	25000,00 kg	0,00 m
Cabina operario	2000,00 kg	7,50 m	2000,00 kg	7,50 m
Cabina control	5000,00 kg	0,00 m	5000,00 kg	0,00 m
Contrapeso	0,00 kg	-7,50 m	0,00 kg	-7,50 m
Cinta alimentación (+ galería)	30000,00 kg	0,00 m	30000,00 kg	0,00 m
Accionamiento traslación	3000,00 kg	4,50 m	3000,00 kg	4,50 m
Base y torre	51456,12 kg	0,00 m	51456,12 kg	0,00 m
Pasarelas base	1970,00 kg	0,00 m	1970,00 kg	0,00 m
Accionamiento rotación (+ engranaje, corona y anillo)	27000,00 kg	0,00 m	27000,00 kg	0,00 m
Producto cinta	2957,21 kg	31,68 m	958,84 kg	5,63 m
Producto tolva	4212,31 kg	38,55 m	4212,31 kg	12,50 m
Producto cinta alimentación	15000,00 kg	0,00 m	15000,00 kg	0,00 m
Acumulación suciedad pluma	716,95 kg	13,55 m	517,11 kg	-12,50 m
Acumulación suciedad cradle	69,04 kg	0,00 m	69,04 kg	0,00 m
Acumulación suciedad base	30,68 kg	0,00 m	30,68 kg	0,00 m
Nieve pluma	13125,00 kg	13,55 m	13125,00 kg	-12,50 m
Nieve cradle	5400,00 kg	0,00 m	5400,00 kg	0,00 m
Nieve base	3200,00 kg	0,00 m	3200,00 kg	0,00 m
Sobrecarga pluma	25000,00 kg	12,30 m	25000,00 kg	-13,75 m
Sobrecarga cradle	9000,00 kg	0,00 m	9000,00 kg	0,00 m
Sobrecarga base	16000,00 kg	0,00 m	16000,00 kg	0,00 m

Tabla 7.4 – Pesos y distancias considerados sobre el cargador

Las distancias incluidas en la tabla anterior (distancia horizontal existente entre el eje de giro del cargador y el punto de aplicación de las cargas) fueron calculadas a partir de los *Planos*. Además, dicha tabla no incluye el valor de la carga de bloqueo de la tolva telescópica, ni el de las cargas de viento, el cual será considerado individualmente en cada modelo más adelante.

7.5.- CÁLCULO DE CARGAS POR ELEMENTO

Una vez conocido el valor de las distintas cargas que actúan sobre el cargador, se calcularán las cargas por elemento (barra o nudo) que actúan sobre la pluma, el cradle, la base y la torre.

7.5.1.- Cálculo de cargas por elemento sobre la pluma

La tabla inferior recoge el valor por elemento de las cargas que actúan sobre la pluma. El cálculo de la carga de viento en servicio y fuera de servicio aparece indicado en color gris en la parte inferior de la tabla en cada caso:

CARGAS POR ELEMENTO PLUMA			
Pluma extendida		Pluma retraída	
Peso pluma	auto KN/m	Peso pluma	auto KN/m
Peso cinta (20 barras)	1,15 kN/m	Peso cinta (20 barras)	1,15 kN/m
Peso tolva (4 nudos)	6,87 kN	Peso tolva (4 nudos)	6,87 kN
Peso cadena (2x22 barras)	0,35 kN	Peso cadena (2x22 barras)	0,35 kN
Peso producto cinta (16 barras)	1,81 kN	Peso producto cinta (6 barras)	1,57 kN
Peso producto tolva (4 nudos)	10,33 kN	Peso producto tolva (4 nudos)	10,33 kN
Peso acumulación suciedad (88 nudos)	0,08 kN	Peso acumulación suciedad (88 nudos)	0,06 kN
Tensión cinta cola (2 barras)	6,08 kN	Tensión cinta cola (2 barras)	6,08 kN
Tensión cinta cabeza (2 barras)	7,31 kN	Tensión cinta cabeza (2 barras)	7,31 kN
Carga viento 1 (4 nudos)	5,26 kN	Carga viento 1 (4 nudos)	5,26 kN
Carga viento 2 (44 nudos)	5,02 kN	Carga viento 2 (44 nudos)	5,02 kN
Carga nieve (88 nudos)	1,46 kN	Carga nieve (88 nudos)	1,46 kN
Sobrecarga (2x21 barras)	5,84 kN	Sobrecarga (2x21 barras)	5,84 kN
Carga bloqueo tolva (4 nudos)	10,33 kN	Carga bloqueo tolva (4 nudos)	10,33 kN
Carga viento fuera servicio 1 (4 nudos)	10,73 kN	Carga viento fuera servicio 1 (4 nudos)	10,73 kN
Carga viento fuera servicio 2 (44 nudos)	10,24 kN	Carga viento fuera servicio 2 (44 nudos)	10,24 kN

Viento 1 y 2		Viento 1 y 2	
q (35 m/s)	750,93 N/m ²	q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F 1	21025,90 N	F 1	21025,90 N
F 2	220771,95 N	F 2	220771,95 N
Viento fuera servicio 1 y 2		Viento fuera servicio 1 y 2	
q (50 m/s)	1532,50 N/m ²	q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F 1	42910,00 N	F 1	42910,00 N
F 2	450555,00 N	F 2	450555,00 N

Tabla 7.5 - Cargas por elemento actuando sobre la pluma

El peso de la pluma se modelará como una carga distribuida uniformemente a lo largo de toda la estructura y será calculado automáticamente por el programa empleado en el cálculo estructural.

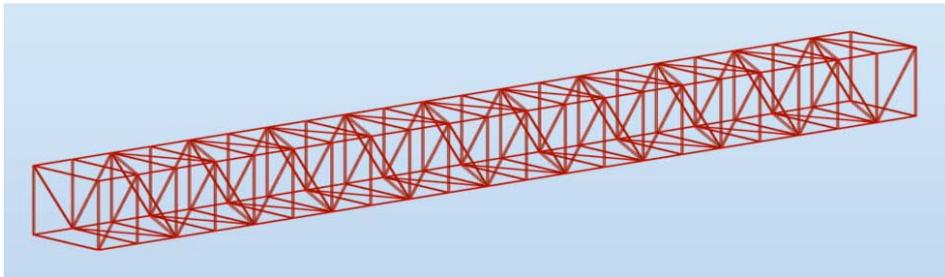


Figura 7.4 - Peso propio de la pluma

El peso de la cinta transportadora se modelará como una carga distribuida uniformemente a lo largo de 20 de las barras horizontales superiores.

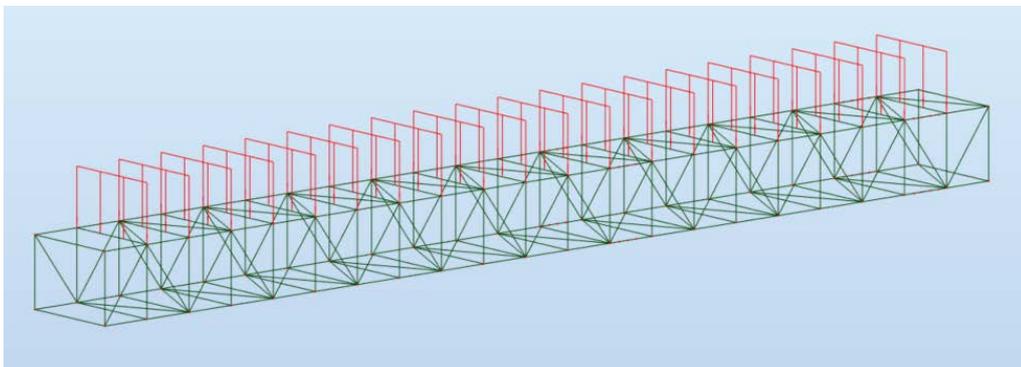


Figura 7.5 - Peso de la cinta transportadora

El peso propio, el peso del producto y la carga de bloqueo de la tolva telescópica se modelarán como cargas puntuales repartidas entre 4 nudos.

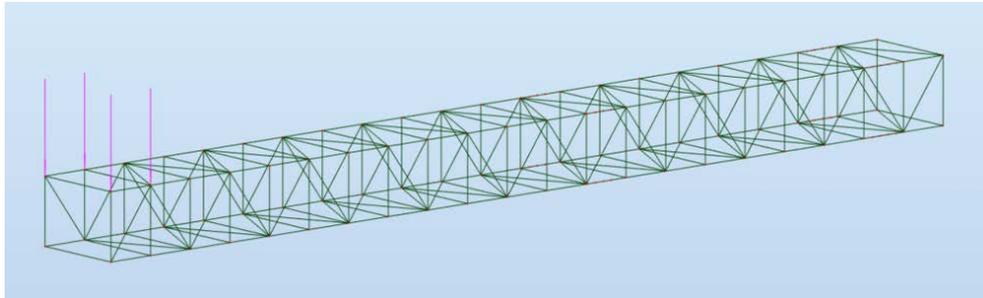


Figura 7.6 - Peso propio, peso del producto y carga de bloqueo de la tolva telescópica

El peso de la cadena de traslación y la sobrecarga de la pluma se modelarán como pares de cargas puntuales repartidas entre 22 y 21 barras, respectivamente.

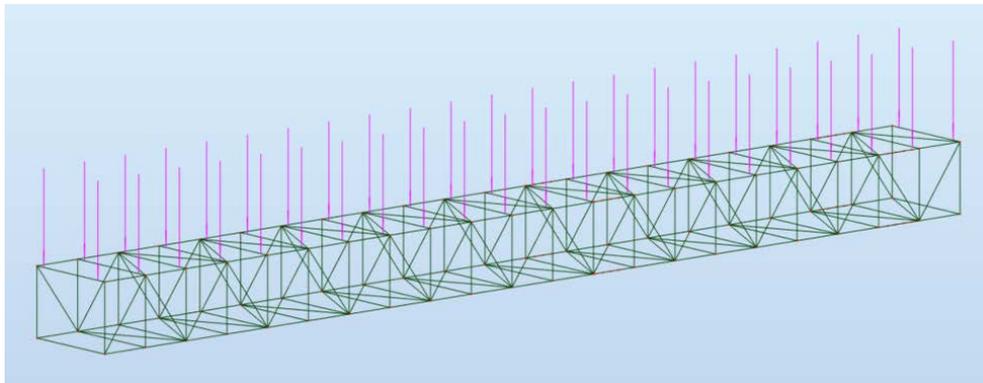


Figura 7.7 - Peso de la cadena de traslación

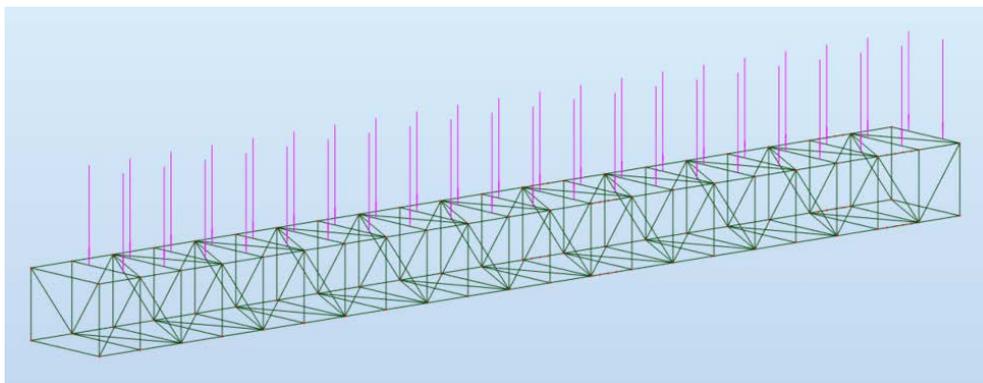


Figura 7.8 - Sobrecarga de la pluma

El peso del producto de la cinta transportadora se modelará como cargas puntuales repartidas entre 16 barras.

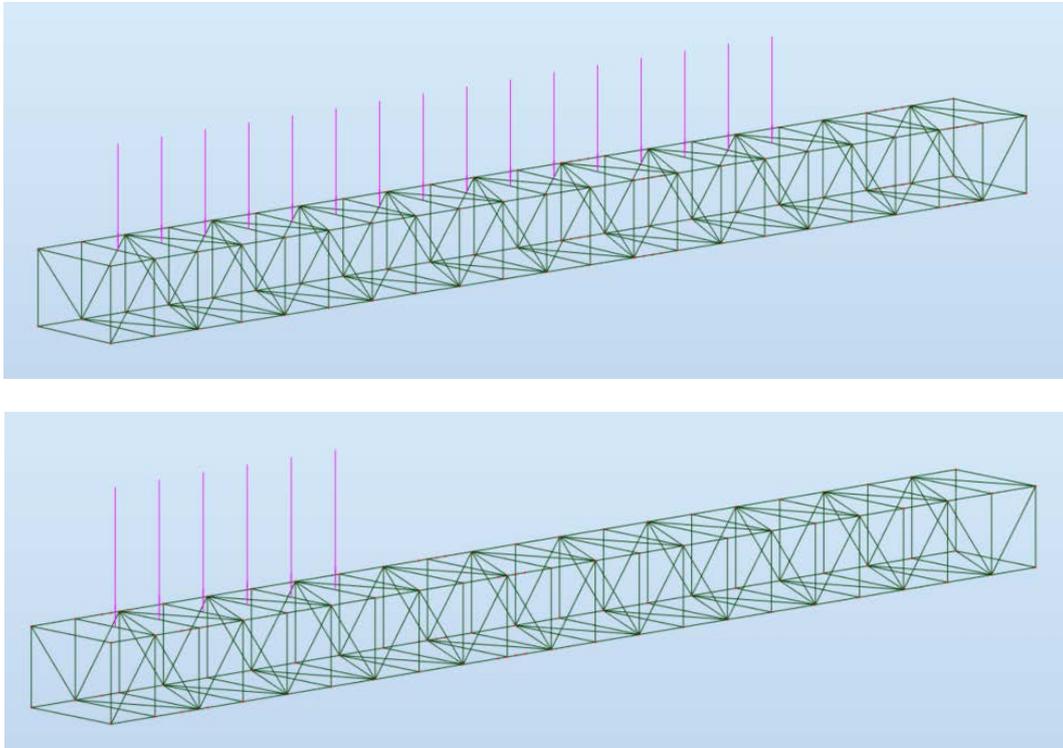


Figura 7.9 - Peso del producto de la cinta transportadora extendida y retraída

La acumulación de suciedad y la carga de nieve en la pluma se modelarán como cargas puntuales repartidas entre los 88 nudos de la estructura.

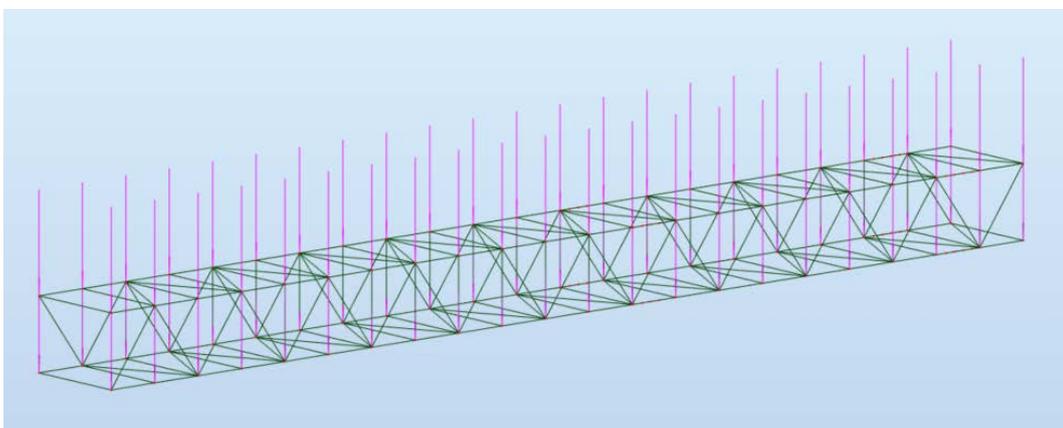


Figura 7.10 - Acumulación de suciedad y carga de nieve sobre la pluma

La tensión de la banda de la cinta transportadora se modelará como cargas puntuales repartidas entre 4 barras (dos para la tensión en cabeza y dos para la tensión en cola).

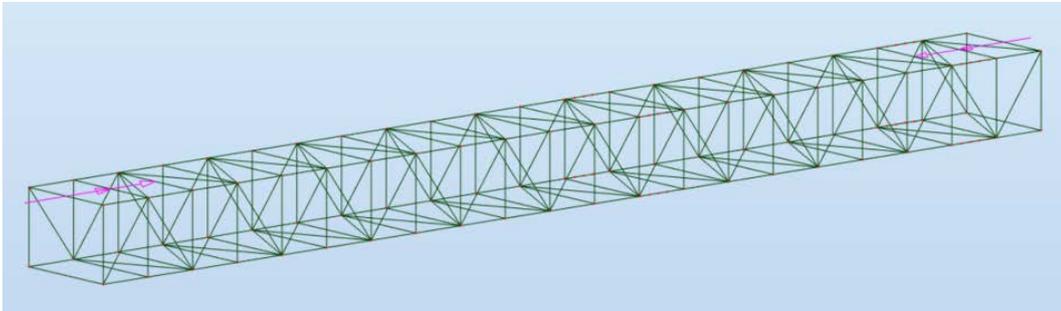
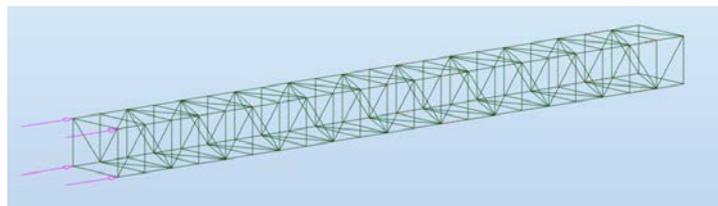
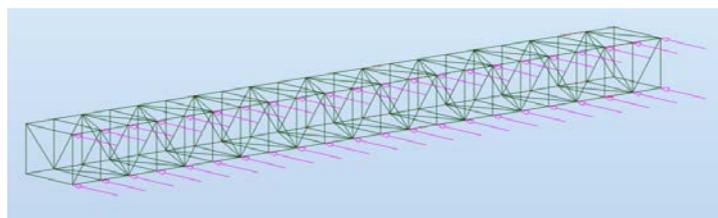


Figura 7.11 - Tensión de la banda de la cinta transportadora

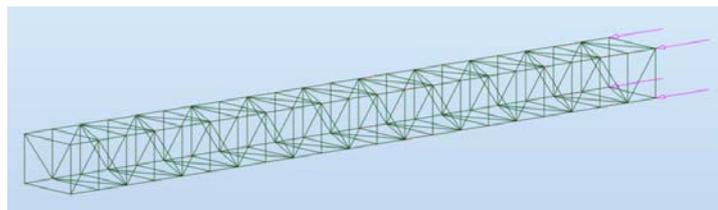
La carga de viento (en servicio y fuera de servicio) frontal y lateral se modelará como cargas puntuales repartidas entre 4 y 44 nudos, respectivamente.



Viento 1



Viento 2



Viento 3

Figura 7.12 - Viento en servicio y fuera de servicio sobre la pluma

Como es de esperar, el viento frontal designado como Viento 3 es igual al Viento 1 en valor absoluto. Además, no es necesario analizar el viento lateral que se correspondería con el Viento 4, ya que todas las cargas aplicadas sobre el cargador son simétricas a excepción del peso de la cabina de control y los esfuerzos producidos por la galería sobre el cradle. De acuerdo con lo anterior, la orientación del viento más desfavorable queda cubierta con el viento lateral designado como Viento 2. Este razonamiento y denominación se mantienen en el resto de modelos analizados a lo largo de todo el proyecto.

7.5.2.- Cálculo de cargas por elemento sobre el cradle

La tabla inferior recoge el valor por elemento de las cargas que actúan sobre el cradle. El cálculo de la carga de viento en servicio y fuera de servicio, así como el cálculo de los esfuerzos producidos en el cradle por las cargas que actúan sobre la pluma (marcados en color azul) y la cinta de alimentación (marcados en color verde), aparecen indicados en color gris en la parte inferior de la tabla en cada caso:

CARGAS POR ELEMENTO CRADLE					
Pluma extendida			Pluma retraída		
Peso cradle	auto	KN/m	Peso cradle	auto	KN/m
Peso pasarelas (14 barras)	1,01	kN & kNm	Peso pasarelas (14 barras)	1,01	kN & kNm
Peso cabina operario (2x2 barras)	4,91	kN	Peso cabina operario (2x2 barras)	4,91	kN
Peso contrapeso (4 nudos)	0,00	kN	Peso contrapeso (4 nudos)	0,00	kN
Peso cabina control (3 barras)	16,35	kN & kNm	Peso cabina control (3 barras)	16,35	kN & kNm
Peso accionamiento traslación (4 nudos)	7,36	kN	Peso accionamiento traslación (4 nudos)	7,36	kN
Peso ruedas apoyo (2x4 barras)	30,66	kN	Peso ruedas apoyo (2x4 barras)		kN
Peso pluma, cinta, tolva izda (2x1 barra)	431,42	kN	Peso pluma, cinta, tolva izda (2x1 barra)	-44,92	kN
Peso pluma, cinta, tolva dcha (2x1 barra)	-102,31	kN	Peso pluma, cinta, tolva dcha (2x1 barra)	374,04	kN
Peso cinta alimentación (2 nudos)	147,15	kN	Peso cinta alimentación (2 nudos)	147,15	kN
Peso producto cinta, producto tolva izda (2x1 barra)	87,36	kN	Peso producto cinta, producto tolva izda (2x1 barra)	28,50	kN
Peso producto cinta, producto tolva dcha (2x1 barra)	-52,20	kN	Peso producto cinta, producto tolva dcha (2x1 barra)	-3,14	kN
Peso producto cinta alimentación (2 nudos)	73,58	kN	Peso producto cinta alimentación (2 nudos)	73,58	kN
Peso acumulación suciedad (28 nudos)	0,02	kN	Peso acumulación suciedad (28 nudos)	0,02	kN
Peso acumulación suciedad pluma izda (2x1 barra)	4,41	kN	Peso acumulación suciedad pluma izda (2x1 barra)	-0,49	kN
Peso acumulación suciedad pluma dcha (2x1 barra)	-0,89	kN	Peso acumulación suciedad pluma dcha (2x1 barra)	3,03	kN

Carga viento 1 (4 nudos)	12,07 kN	Carga viento 1 (4 nudos)	12,07 kN
Carga viento 2 (14 nudos)	10,35 kN	Carga viento 2 (14 nudos)	10,35 kN
Carga viento pluma 2 izda (2x1 barra)	138,30 kN	Carga viento pluma 2 izda (2x1 barra)	-21,46 kN
Carga viento pluma 2 dcha (2x1 barra)	-27,92 kN	Carga viento pluma 2 dcha (2x1 barra)	131,85 kN
Carga viento galería horizontal (2 nudos)	71,40 kN	Carga viento galería horizontal (2 nudos)	71,40 kN
Carga viento galería vertical (2 nudos)	14,28 kN	Carga viento galería vertical (2 nudos)	14,28 kN
Carga nieve cradle (28 nudos)	1,89 kN	Carga nieve cradle (28 nudos)	1,89 kN
Carga nieve pluma izda (2x1 barra)	80,66 kN	Carga nieve pluma izda (2x1 barra)	-12,52 kN
Carga nieve pluma dcha (2x1 barra)	-16,28 kN	Carga nieve pluma dcha (2x1 barra)	76,90 kN
Sobrecarga (14 barras)	6,31 kN & kNm	Sobrecarga (14 barras)	6,31 kN & kNm
Sobrecarga pluma izda (2x1 barra)	145,12 kN	Sobrecarga pluma izda (2x1 barra)	-32,36 kN
Sobrecarga pluma dcha (2x1 barra)	-22,49 kN	Sobrecarga pluma dcha (2x1 barra)	154,98 kN
Carga bloqueo tolva izda (2x1 barra)	54,58 kN	Carga bloqueo tolva izda (2x1 barra)	24,68 kN
Carga bloqueo tolva dcha (2x1 barra)	-33,92 kN	Carga bloqueo tolva dcha (2x1 barra)	-4,02 kN
Carga viento fuera servicio 1 (4 nudos)	24,64 kN	Carga viento fuera servicio 1 (4 nudos)	24,64 kN
Carga viento fuera servicio 2 (14 nudos)	21,12 kN	Carga viento fuera servicio 2 (14 nudos)	21,12 kN
Carga viento fuera servicio pluma 2 izda (2x1 barra)	282,25 kN	Carga viento fuera servicio pluma 2 izda (2x1 barra)	-43,80 kN
Carga viento fuera servicio pluma 2 dcha (2x1 barra)	-56,97 kN	Carga viento fuera servicio pluma 2 dcha (2x1 barra)	269,08 kN
Carga viento fuera servicio galería horizontal (2 nudos)	145,72 kN	Carga viento fuera servicio galería horizontal (2 nudos)	145,72 kN
Carga viento fuera servicio galería vertical (2 nudos)	29,14 kN	Carga viento fuera servicio galería vertical (2 nudos)	29,14 kN
Pluma, cinta y tolva		Pluma, cinta y tolva	
F	67098,69 kg	F	67098,69 kg
d	14,60 m	d	-11,46 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	87956,09 kg	Ri	-9158,08 kg
Rd	-20857,40 kg	Rd	76256,76 kg
Producto cinta y tolva		Producto cinta y tolva	
F	7169,52 kg	F	5171,15 kg
d	35,72 m	d	11,23 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	17810,78 kg	Ri	5810,43 kg
Rd	-10641,27 kg	Rd	-639,28 kg
Acumulación suciedad pluma		Acumulación suciedad pluma	
F	716,95 kg	F	517,11 kg
d	13,55 m	d	-12,50 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	898,26 kg	Ri	-100,55 kg
Rd	-181,31 kg	Rd	617,66 kg
Viento 1 y 2		Viento 1 y 2	
q (35 m/s)	750,93 N/m ²	q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F 1	48299,50 N	F 1	48299,50 N
F 2	144898,49 N	F 2	144898,49 N

Viento pluma 2		Viento pluma 2	
F	22504,79 kg	F	22504,79 kg
d	13,55 m	d	-12,50 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	28196,00 kg	Ri	-4375,93 kg
Rd	-5691,21 kg	Rd	26880,72 kg
Viento cinta alimentación		Viento cinta alimentación	
q (35 m/s)	750,93 N/m ²	q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F H	142808,61 N	F H	142808,61 N
M	42842,58 Nm	M	42842,58 Nm
F V	28561,72 N	F V	28561,72 N
Nieve pluma		Nieve pluma	
F	13125,00 kg	F	13125,00 kg
d	13,55 m	d	-12,50 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	16444,17 kg	Ri	-2552,08 kg
Rd	-3319,17 kg	Rd	15677,08 kg
Sobrecarga pluma		Sobrecarga pluma	
F	25000,00 kg	F	25000,00 kg
d	12,30 m	d	-13,75 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	29586,11 kg	Ri	-6597,22 kg
Rd	-4586,11 kg	Rd	31597,22 kg
Bloqueo tolva		Bloqueo tolva	
F	4212,31 kg	F	4212,31 kg
d	38,55 m	d	12,50 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	11127,99 kg	Ri	5031,37 kg
Rd	-6915,68 kg	Rd	-819,06 kg
Viento fuera servicio 1 y 2		Viento fuera servicio 1 y 2	
q (50 m/s)	1532,50 N/m ²	q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F 1	98570,40 N	F 1	98570,40 N
F 2	295711,20 N	F 2	295711,20 N
Viento fuera servicio pluma 2		Viento fuera servicio pluma 2	
F	45928,13 kg	F	45928,13 kg
d	13,55 m	d	-12,50 m
a	9,00 m	a	9,00 m
Ri	57542,85 kg	Ri	-8930,47 kg
Rd	-11614,71 kg	Rd	54858,61 kg
Viento fuera servicio cinta alimentación		Viento fuera servicio cinta alimentación	
q (50 m/s)	1532,50 N/m ²	q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F H	291446,15 N	F H	291446,15 N
M	87433,84 Nm	M	87433,84 Nm
F V	58289,23 N	F V	58289,23 N

Tabla 7.6 - Cargas por elemento actuando sobre el cradle

El peso del cradle se modelará como una carga distribuida uniformemente a lo largo de toda la estructura y será calculado automáticamente por el programa empleado en el cálculo estructural.

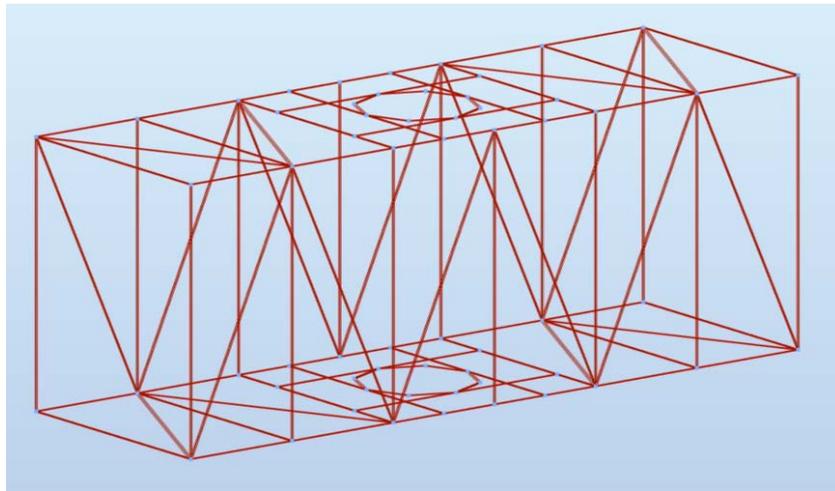


Figura 7.13 - Peso propio del cradle

El peso de las pasarelas del cradle, el peso de la cabina de control y la sobrecarga del cradle se modelarán como una carga puntual y un momento repartidos entre 14, 3 y 14 barras, respectivamente.

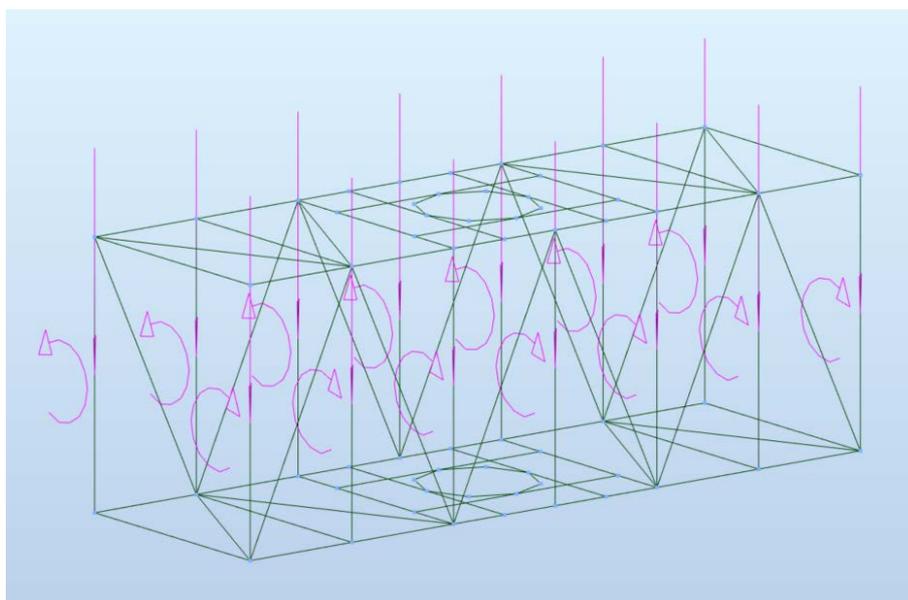


Figura 7.14 - Peso de las pasarelas del cradle

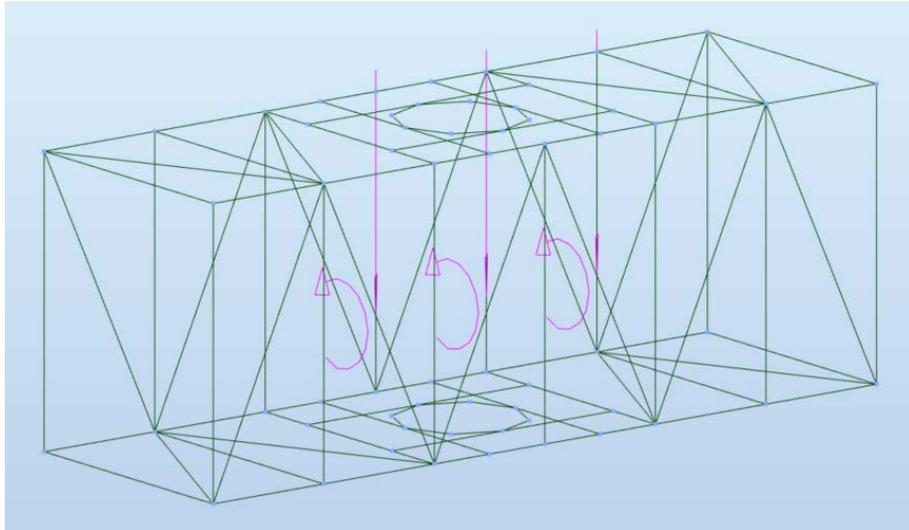


Figura 7.15 - Peso de la cabina de control

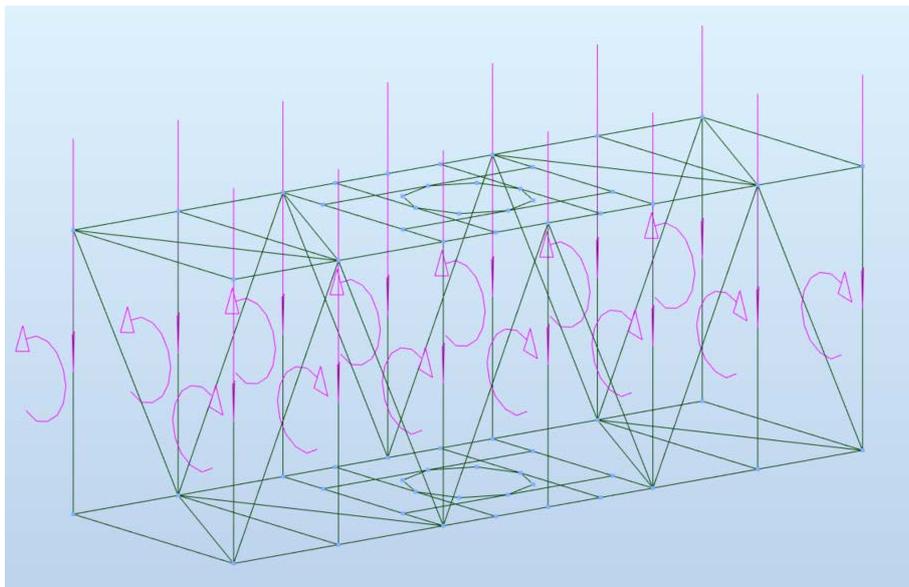


Figura 7.16 - Sobrecarga del cradle

El peso de la cabina del operario y el peso de las ruedas de apoyo se modelarán como pares de cargas puntuales repartidas entre 2 y 4 barras, respectivamente.

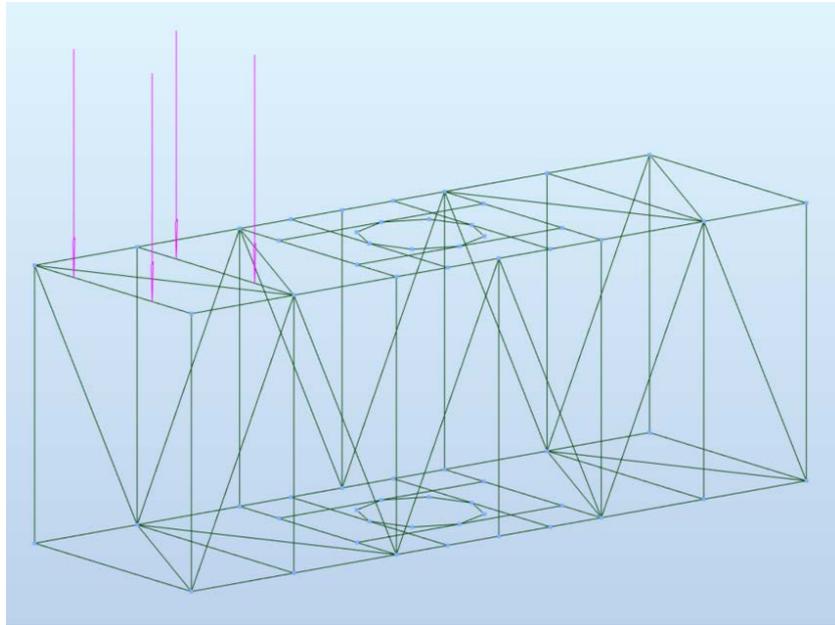


Figura 7.17 - Peso de la cabina del operario

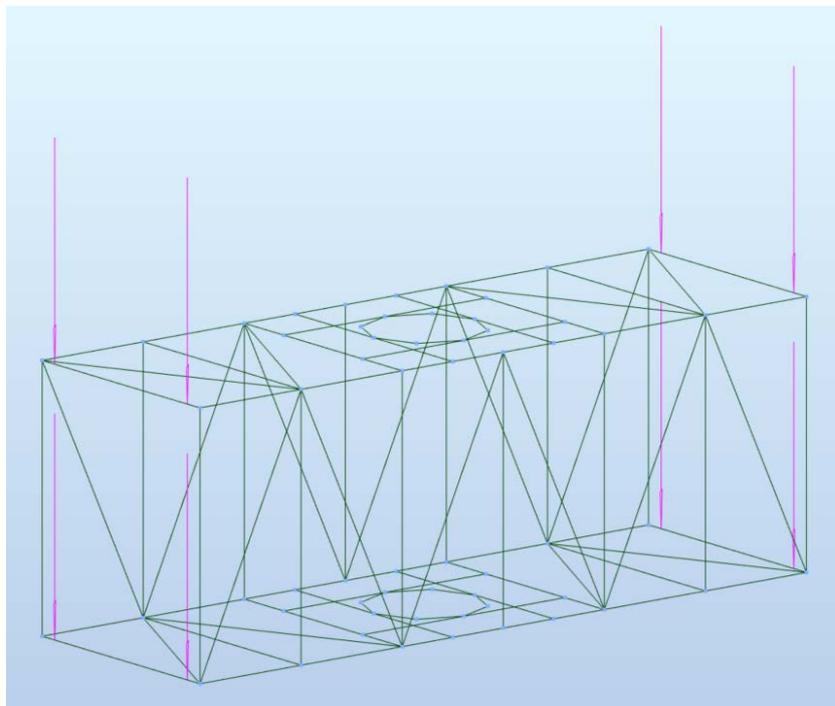


Figura 7.18 - Peso de las ruedas de apoyo

El peso del contrapeso y del accionamiento de traslación se modelarán como cargas puntuales repartidas entre 4 nudos.

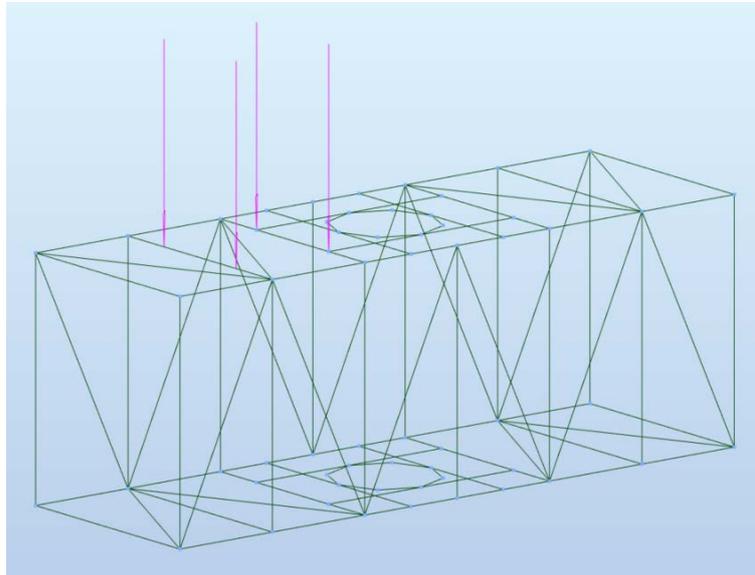


Figura 7.19 - Peso del accionamiento de traslación

La acumulación de suciedad y la carga de nieve en el cradle se modelarán como cargas puntuales repartidas entre los 28 nudos de la estructura.

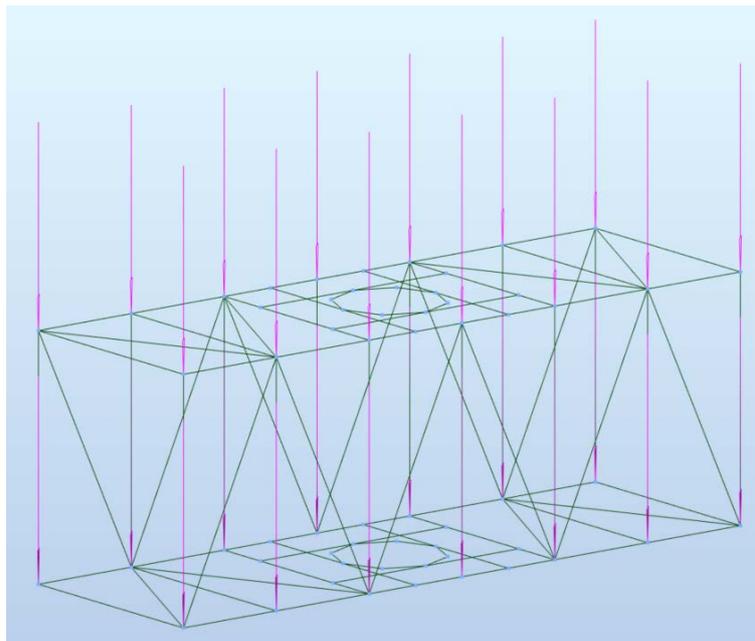
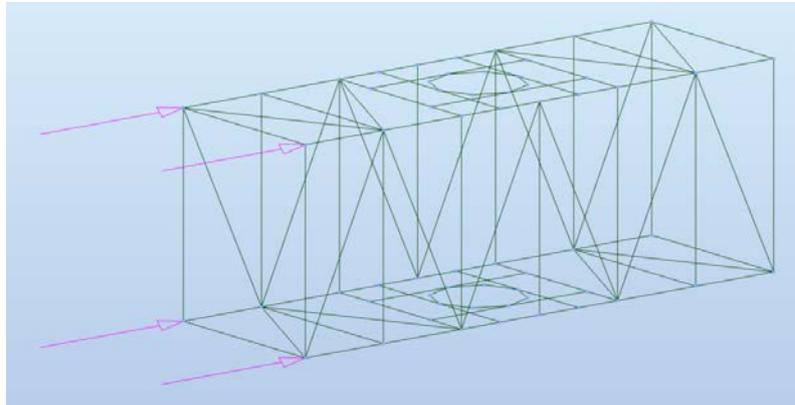
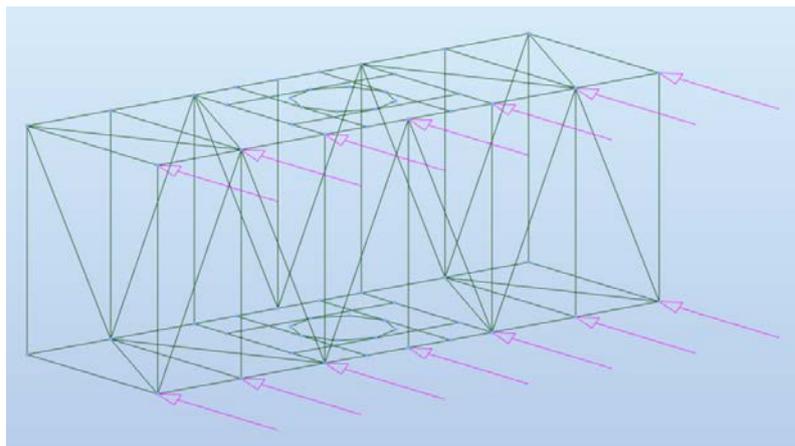


Figura 7.20 - Acumulación de suciedad y carga de nieve sobre el cradle

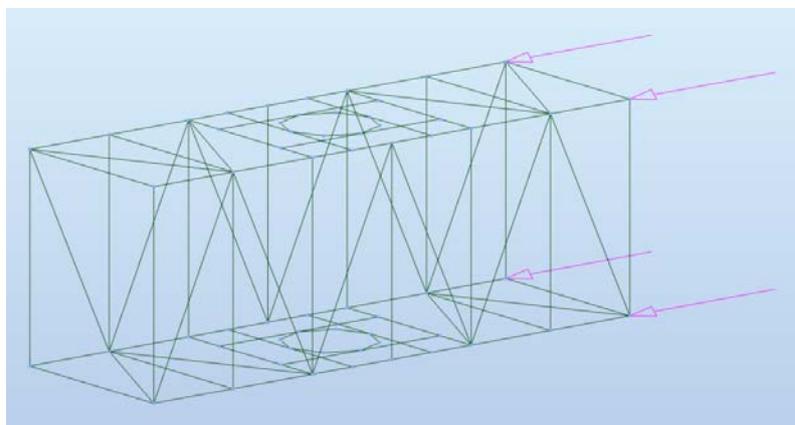
La carga de viento (en servicio y fuera de servicio) frontal y lateral se modelará como cargas puntuales repartidas entre 4 y 14 nudos, respectivamente.



Viento 1



Viento 2



Viento 3

Figura 7.21 - Viento en servicio y fuera de servicio sobre el cradle

Los esfuerzos producidos en el cradle por las cargas que actúan sobre la pluma se modelarán como pares de cargas puntuales repartidas entre 2 barras (aquellas sobre las que descansarían los apoyos de la pluma sobre el cradle).

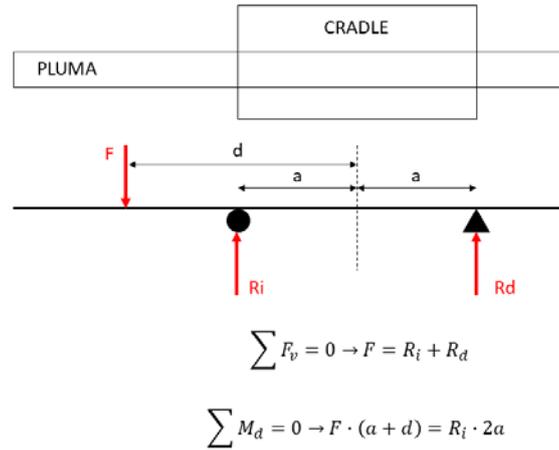


Tabla 7.7 - Modelización matemática del apoyo de la pluma sobre el cradle para el cálculo de la transmisión de esfuerzos entre ambos

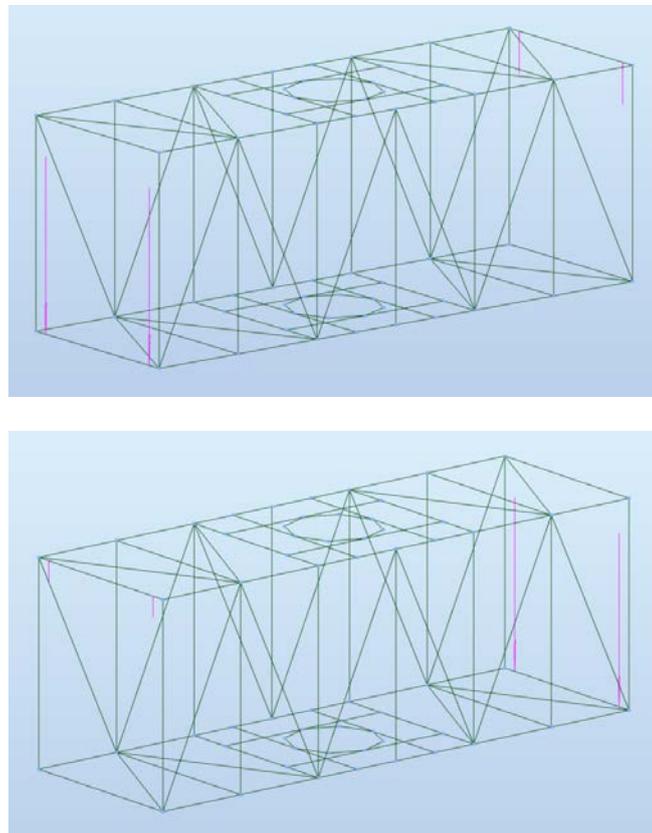


Figura 7.22 – Esfuerzos producidos en el cradle por las cargas actuando sobre la pluma extendida y retraída

Tal y como se puede observar en las imágenes anteriores, las ruedas de apoyo izquierdas se corresponden con las ruedas delanteras (las que soportan un mayor esfuerzo cuando la pluma se encuentra totalmente extendida) y las ruedas de apoyo derechas con las ruedas traseras. Esta denominación se mantendrá a lo largo de todo el proyecto.

Los esfuerzos producidos en el cradle por las cargas que actúan sobre la galería, la cual descansa sobre el anillo superior del cradle a través de unos apoyos en forma de pastilla deslizante, se modelarán como cargas puntuales verticales (en el caso del peso de la galería y del producto transportado a través de la misma) y como cargas puntuales verticales y horizontales (en el caso del viento actuando sobre la galería, lo cual equivale a un esfuerzo horizontal y un momento, repartidas entre 2 nudos en cada caso. Las imágenes inferiores muestran el apoyo de la galería sobre el cradle, así como la modelización de la transmisión de dichos esfuerzos:



Figura 7.23 - Apoyo de la galería de la cinta transportadora de alimentación sobre el anillo superior del cradle

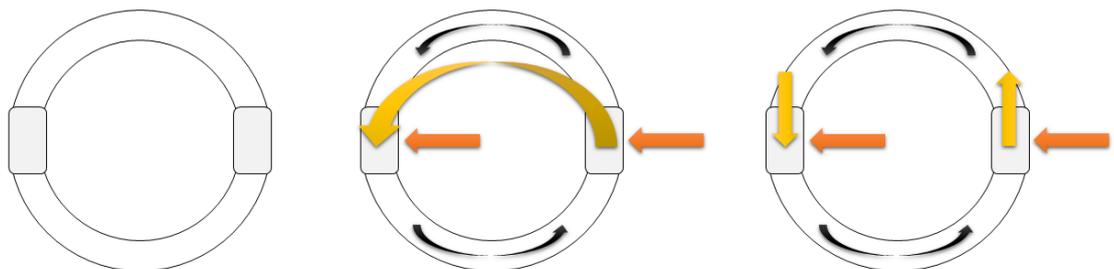


Figura 7.24 - Representación esquemática de la transmisión de esfuerzos entre la galería de la cinta transportadora de alimentación y el anillo superior del cradle

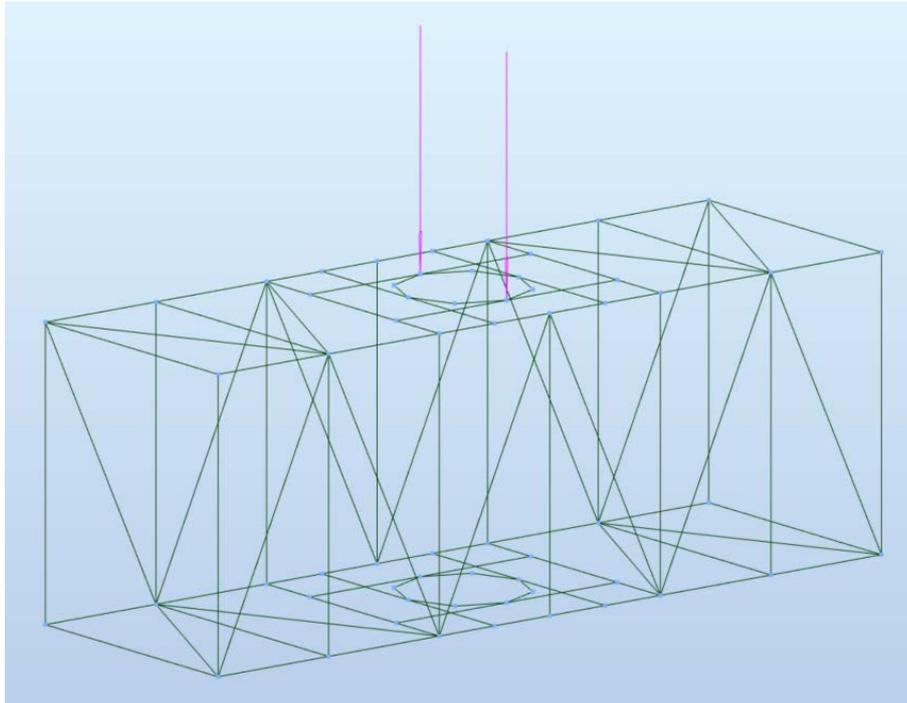


Figura 7.25 – Esfuerzos producidos en el cradle por el peso propio y peso del producto de la cinta transportadora de alimentación

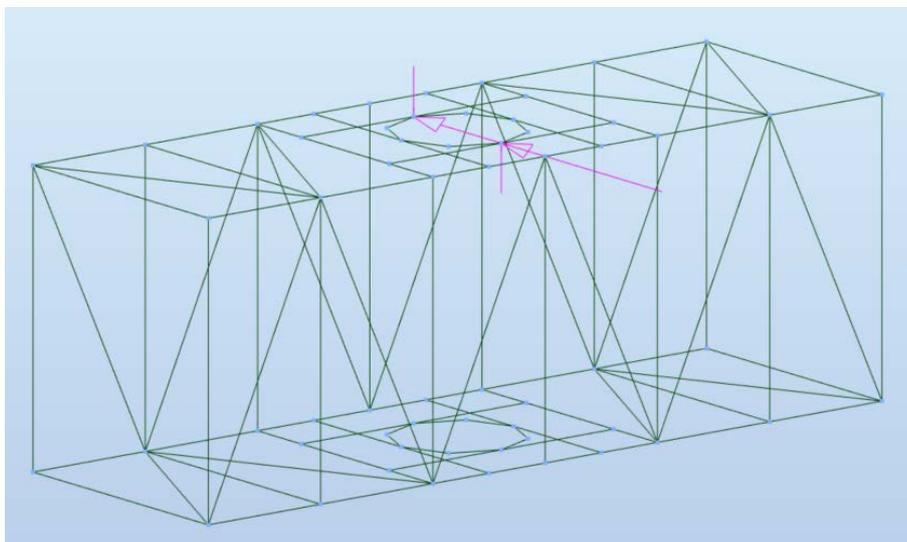


Figura 7.26 - Viento en servicio y fuera de servicio sobre la cinta transportadora de alimentación

7.5.3.- Cálculo de cargas por elemento sobre la base y la torre

La tabla inferior recoge el valor por elemento de las cargas que actúan sobre la base y la torre. El cálculo de la carga de viento en servicio y fuera de servicio aparece indicado en color gris en la parte inferior de la tabla en cada caso:

CARGAS POR ELEMENTO BASE Y TORRE			
Pluma 0-90 °		Pluma 45 °	
Peso base y torre	auto KN/m	Peso base y torre	auto KN/m
Peso pasarelas (8 barras)	2,42 kN	Peso pasarelas (8 barras)	2,42 kN
Peso accionamiento rotación (8 nudos)	33,11 kN	Peso accionamiento rotación (8 nudos)	33,11 kN
Peso acumulación suciedad (12 nudos)	0,03 kN	Peso acumulación suciedad (12 nudos)	0,03 kN
Carga viento (7 nudos)	5,49 kN	Carga viento (12 nudos)	4,53 kN
Carga nieve (12 nudos)	2,62 kN	Carga nieve (12 nudos)	2,62 kN
Sobrecarga (8 barras)	19,62 kN	Sobrecarga (8 barras)	19,62 kN
Carga viento fuera servicio (7 nudos)	11,21 kN	Carga viento fuera servicio (12 nudos)	9,25 kN
Viento q (35 m/s)	750,93 N/m ²	Viento q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F	38447,36 N	F	54372,78 N
Viento fuera servicio q (50 m/s)	1532,50 N/m ²	Viento fuera servicio q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F	78464,00 N	F	110964,85 N

Figura 7.27 - Cargas por elemento actuando sobre la base y la torre

El peso de la base y de la torre se modelará como una carga distribuida uniformemente a lo largo de toda la estructura y será calculado automáticamente por el programa empleado en el cálculo estructural.

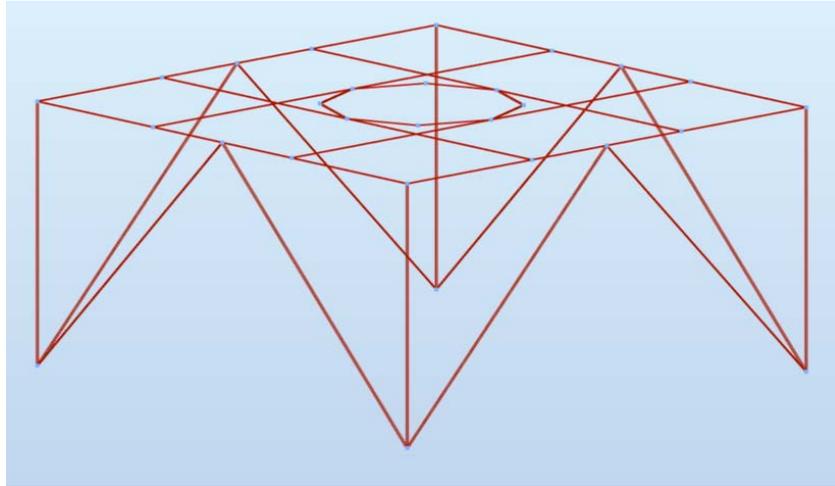


Figura 7.28 - Peso propio de la base y de la torre

El peso de las pasarelas y la sobrecarga de la base se modelarán como cargas puntuales repartidas entre 8 barras.

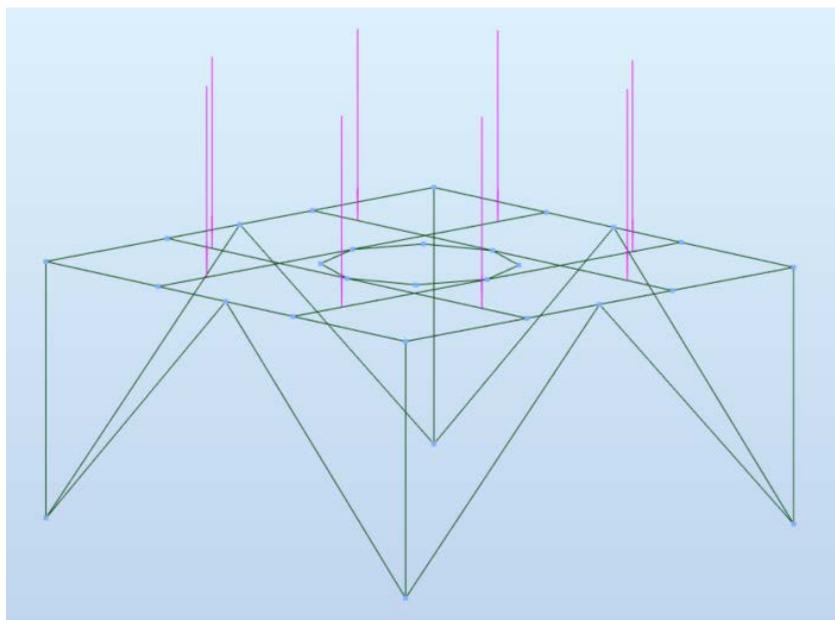


Figura 7.29 - Peso de las pasarelas y sobrecarga de la base

El peso del accionamiento de rotación, la acumulación de suciedad y la carga de nieve se modelarán como cargas puntuales repartidas entre 8, 12 y 12 nudos, respectivamente.

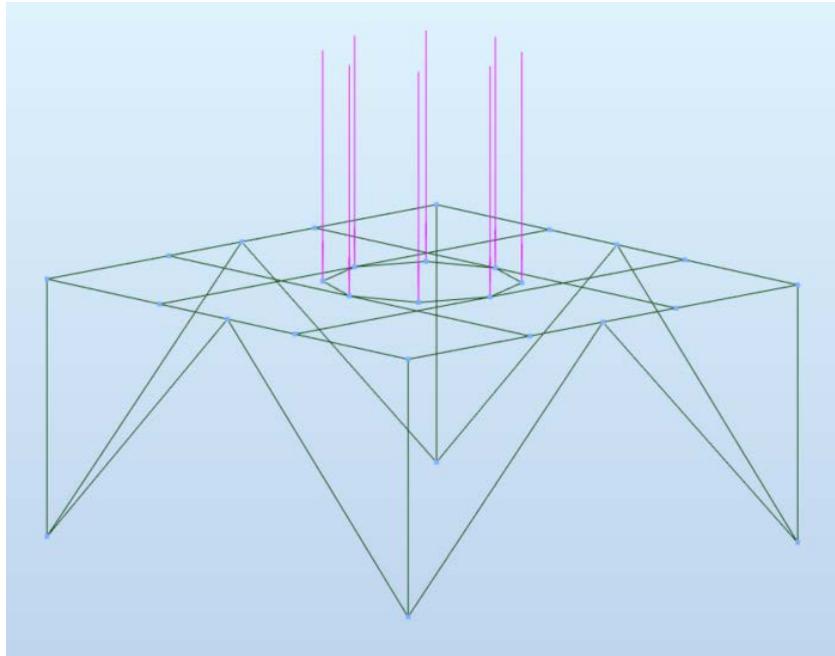


Figura 7.30 - Peso del accionamiento de rotación

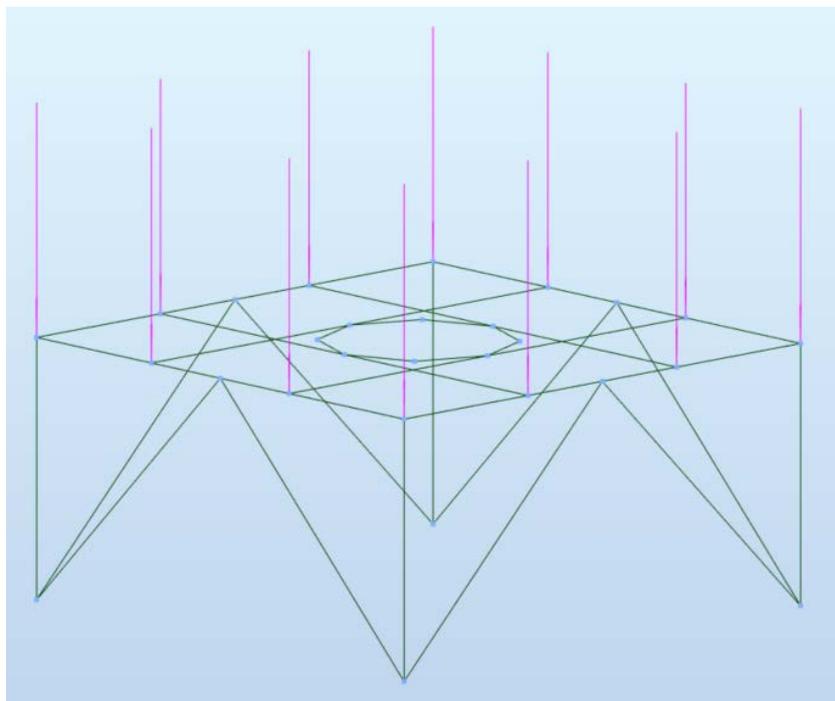
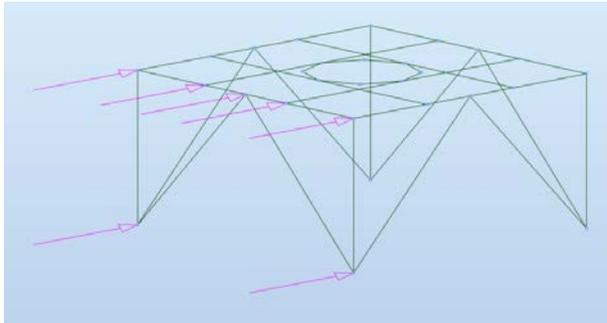
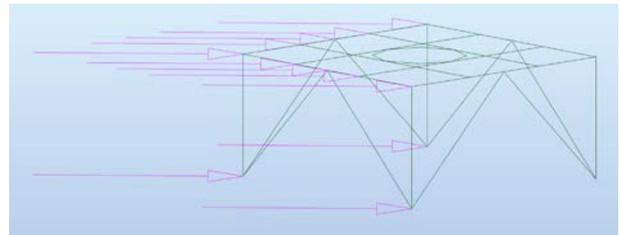


Figura 7.31 - Acumulación de suciedad y carga de nieve sobre la base

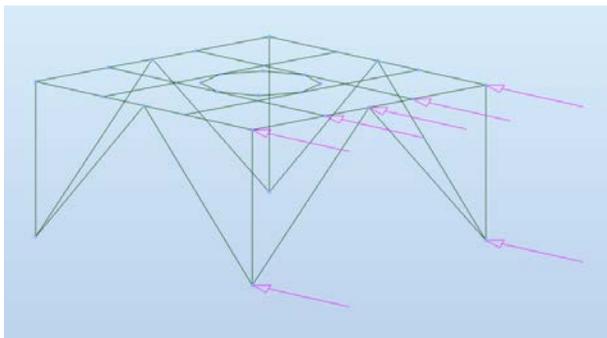
La carga de viento (en servicio y fuera de servicio) frontal y lateral se modelará como cargas puntuales repartidas entre 7 nudos cuando la pluma está posicionada a 0° o 90° y entre 12 nudos cuando la pluma está posicionada a 45° .



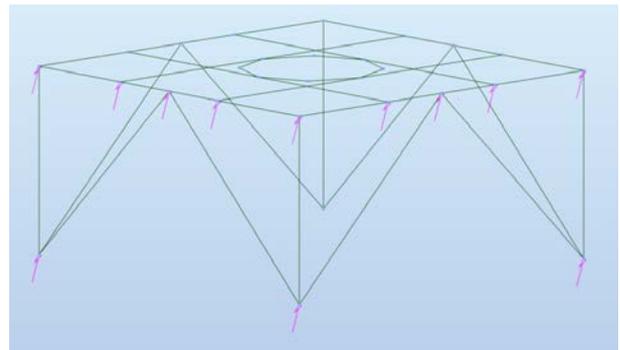
Viento 1



Viento 1



Viento 2



Viento 2

Figura 7.32 - Viento en servicio y fuera de servicio sobre la base y la torre posicionada a 0° (izda) y 45° (dcha)

7.6.- CÁLCULO DEL NÚMERO DE RUEDAS DE APOYO

Una vez calculados los esfuerzos producidos en el cradle por las cargas que actúan sobre la pluma, es posible obtener la carga soportada por cada rueda de apoyo de acuerdo con lo establecido por la FEM [17]. Como es de esperar, la máxima carga será soportada por las ruedas delanteras inferiores cuando la pluma esté totalmente extendida. En estas condiciones, la carga media soportada por cada rueda en los casos de carga I y II tiene un valor de:

Ruedas apoyo	
Carga media caso carga I por rueda (PmeanI)	89573,76 N
Carga media caso carga II por rueda (PmeanII)	152042,40 N
Número de ruedas por bogie	4
Carga media caso carga I por bogie	358295,03 N
Carga media caso carga II por bogie	608169,59 N

Tabla 7.8 - Presión media soportada por cada rueda de apoyo

La carga media es calculada a partir de las cargas máximas y mínimas que actúan sobre las ruedas de apoyo. De esta forma, se tienen en cuenta únicamente las cargas radiales que dan lugar a reacciones de compresión (cuando la pluma se encuentra totalmente retraída, la reacción en las ruedas delanteras inferiores será de tracción para la mayor parte de las cargas y se considerará un valor mínimo nulo), mientras que en el caso de las cargas no radiales (presión debida a la carga de viento sobre la pluma) se tienen en cuenta los valores absolutos de las reacciones en ambos sentidos.

De esta forma, el diámetro mínimo, así como el diámetro seleccionado para cada rueda de apoyo aparece indicado en la tabla inferior, donde las variables marcadas en gris son datos necesarios para calcular dicho diámetro:

Ruedas apoyo	
Diámetro mínimo (caso carga I)	247,72 mm
Diámetro mínimo (caso carga II)	275,44 mm
Diámetro seleccionado	400 mm
Carga media caso carga I por rueda (PmeanI)	89573,76 N
Carga media caso carga II por rueda (PmeanII)	152042,40 N
Anchura útil raíl (b)	80 mm
Presión admisible (pL)	5 N/mm ²
Coeficiente C1 máximo	1,2
Coeficiente C2 máximo	1,15
Coeficiente C1	1,13
Coeficiente C2	0,8

Tabla 7.9 – Diámetro mínimo y seleccionado de las ruedas de apoyo

Tal y como se puede observar, las ruedas de apoyo deberían soportar las cargas a las que están sometidas si se selecciona un diámetro de 315 mm. Sin embargo, para trabajar del lado de la seguridad, cada apoyo de la pluma consistirá en un conjunto de 4 ruedas de 400 mm de diámetro, separadas una distancia de 100 mm y montadas sobre un bogie.

Las imágenes inferiores muestran la disposición y geometría habitual de las ruedas de apoyo en los cargadores de barcos:



Figura 7.33 - Ruedas de apoyo montadas sobre un bogie en un cargador de barcos [19]

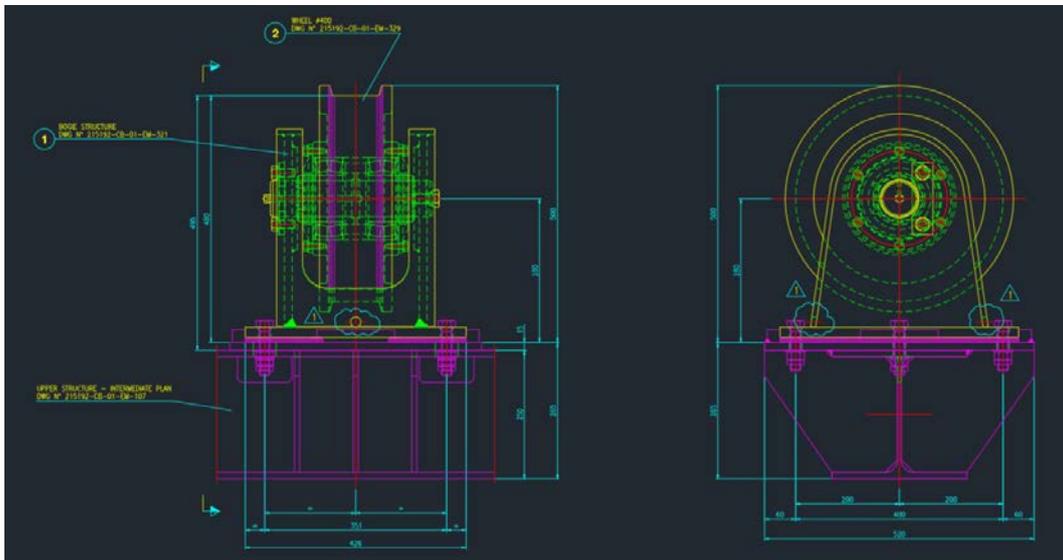


Figura 7.34 - Alzado y perfil de una rueda de apoyo

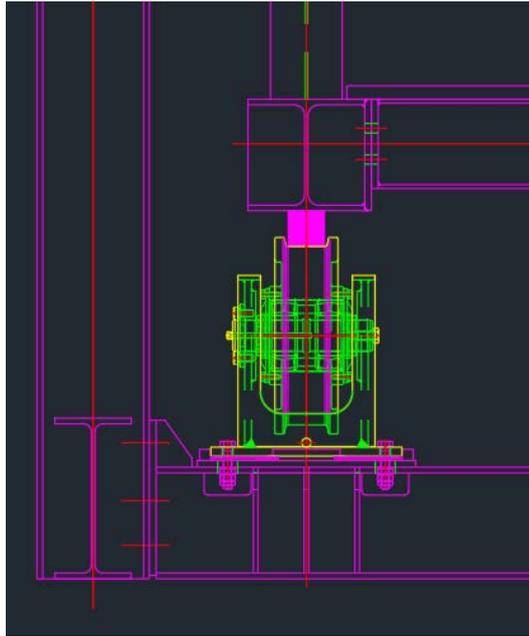


Figura 7.35 - Sección de una rueda de apoyo soportando la pluma de un cargador

De acuerdo con lo indicado en el presente apartado, las ruedas de apoyo se definirán sobre un modelo alámbrico tal y como se muestra a continuación:

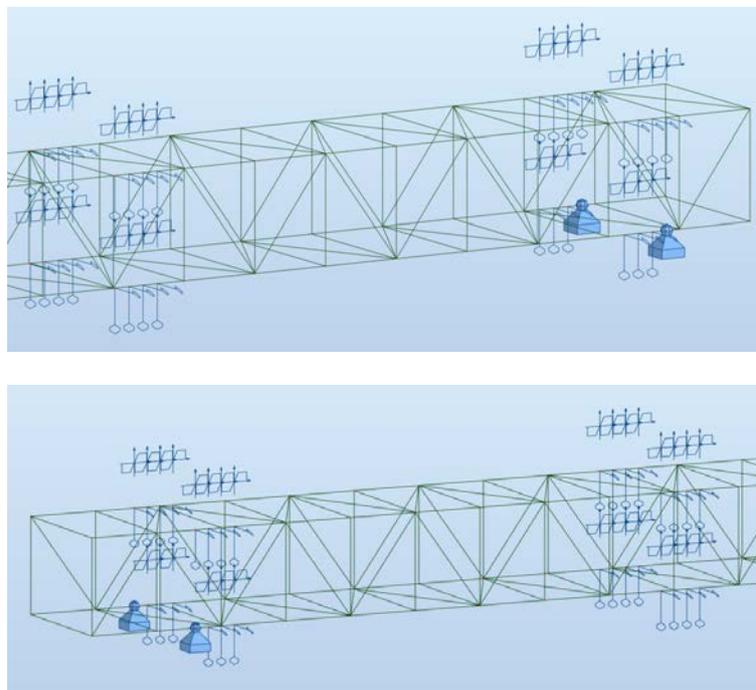


Figura 7.36 - Modelo de los apoyos de la pluma extendida y retraída sobre el cradle

8. Cálculo estructural en Robot

El presente capítulo incluye una descripción del modelado alámbrico del cargador y su posterior cálculo estructural a través del software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018.

Para analizar la causa del fallo de las distintas barras se empleará el Eurocode [20] [21], el cual proporciona la información necesaria para identificar el tipo de sección más propicio para soportar los esfuerzos que están provocando dicho fallo.

Tal y como se indicará más adelante, se emplearán perfiles en I para las vigas longitudinales, mientras que el resto de vigas consistirán en perfiles cerrados de sección cuadrada o rectangular para prevenir posibles problemas de corrosión, dado que el cargador estará situado junto al mar.

8.1.- CRITERIOS DE DISEÑO

Los distintos elementos que constituyen el cargador consisten en celosías espaciales, por lo que los esfuerzos experimentados por las distintas barras serán predominantemente de tensión o compresión. De esta forma, de acuerdo con lo establecido por la FEM [17], los valores admisibles de tensión para cada caso de carga son los indicados a continuación:

Caso de carga	I	II	III
Coefficiente de seguridad	1,5	1,33	1,2
Tensión admisible	$\sigma_E/1,5$	$\sigma_E/1,33$	$\sigma_E/1,2$

Tabla 8.1 - Tensión admisible para cada caso de carga

El material seleccionado para la construcción de todos los elementos estructurales será el acero Fe 360, cuyos valores característicos quedan recogidos en la siguiente tabla:

Grado de acero	σ_E MPa	σ_R MPa	σ_E/σ_R	E MPa	G MPa	αt Mm/mmK
Fe 360	240	370	0,65	$21 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Tabla 8.2 - Valores característicos del acero Fe 360

De esta forma, el valor de la tensión admisible es el mostrado en la tabla inferior:

Grado del acero	σ_E	Tensión admisible		
		Caso I	Caso II	Caso III
	MPa	MPa	MPa	MPa
Fe 360	240	160	180	200

Tabla 8.3 - Tensión admisible para cada caso de carga del acero Fe 360

Los perfiles seleccionados para cada barra deberán ser dimensionados de forma que la máxima tensión no supere el valor admisible indicado anteriormente.

Por otro lado, en condiciones de flecha máxima, el correcto funcionamiento del mecanismo no debe verse afectado. La FEM [17] no establece ningún criterio numérico para evaluar dicho comportamiento, por lo que se considerará un valor máximo admisible de 1/200, el cual no debe ser superado en ningún caso.

8.2.- MODELADO DE LA ESTRUCTURA

Tal y como se indicó anteriormente, la estructura del cargador consiste en una celosía espacial. Teóricamente, una celosía está compuesta por barras sometidas únicamente a esfuerzos de tracción o compresión, las cuales están unidas mediante articulaciones (no transmiten momentos).

Sin embargo, esas condiciones no representan adecuadamente la situación real, en la que, a pesar de que los esfuerzos soportados por las barras sean predominantemente axiales, la unión entre barras se realiza mediante nudos rígidos. Únicamente el arriostramiento puede considerarse articulado en ambos extremos, tal y como se puede observar en la siguiente imagen:



Figura 8.1 - Arriostramiento articulado en los extremos

El software Robot consta de distintos módulos en función del tipo de estructura a analizar: edificio, celosía, pórtico, lámina, placa... Por ello, la forma más correcta de modelar la estructura del cargador será como un pórtico espacial, es decir, las barras por defecto serán de tipo viga y estarán unidas mediante nudos rígidos, mientras que habrá que indicar manualmente qué barras son de tipo celosía (barras biarticuladas sometidas exclusivamente a esfuerzos de tracción y compresión), como es el caso del arriostramiento.

8.3.- MODELADO ALÁMBRICO DE LA PLUMA

El modelo alámbrico de la pluma fue definido siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- **Nudos.** A partir de sus coordenadas, se definen los distintos nudos de forma que la estructura quede centrada en el plano XY y su parte inferior a una altura de 1 m.
- **Barras.** Se definen las barras existentes entre los distintos nudos como elementos de tipo viga. Posteriormente, se modifican las barras que conforman el arriostramiento de la estructura para que trabajen como elementos de tipo celosía.
- **Apoyos.** La pluma irá apoyada sobre el cradle a través de 16 ruedas en la parte inferior y otras 16 ruedas en la parte superior. Los dos primeros apoyos de la parte inferior se modelan como rótulas para hacer posible el cálculo estático, mientras que el resto de apoyos inferiores permiten el movimiento en la dirección X y en el sentido positivo del eje Z. Por otro lado, los apoyos de la parte superior permiten el movimiento en la dirección X y en el sentido negativo del eje Z.
- **Material.** Se define el acero Fe 360 a partir de sus valores característicos.
- **Sección.** Se utilizarán perfiles del tipo HE para las vigas longitudinales y tubos de sección cuadrada para las vigas verticales, horizontales y el arriostramiento.
- **Casos de carga y combinaciones.** Se definen las distintas cargas que actúan sobre la pluma, así como las combinaciones de estas que dan lugar a los casos de carga a tener en cuenta.
- **Tipo de análisis.** Se define el tipo de análisis a tener en cuenta. Se llevarán a cabo análisis de tipo estático y a pandeo lineales. En este caso, el movimiento de algunos nudos está restringido únicamente en uno de los sentidos de una determinada dirección, por lo que la resolución del problema será no lineal.

Una vez definido el modelo de la pluma, se realizará el dimensionamiento de las distintas barras de acero, lo cual puede resumirse en los siguientes puntos:

- **Grupos.** Se definen grupos con aquellas barras que vayan a tener una misma sección.
- **Dimensionamiento de los grupos.** Se dimensiona cada uno de los grupos definidos anteriormente buscando una optimización del peso de la estructura.
- **Verificación.** Se verifica el comportamiento de las distintas barras hasta que todas sean capaces de soportar los esfuerzos a los que son sometidas.
- **Resultados.** Se comprueban los resultados obtenidos hasta lograr que se cumplan las condiciones de flecha y tensión máximas.

Una vez finalizada la etapa de diseño, se tienen los perfiles y peso estructural mostrados a continuación:

PLUMA	
MATERIAL	
Acero FEM	Fe 360
PERFILES	
Vigas longitudinales superiores	HEA 500
Vigas longitudinales inferiores	HEB 600
Vigas transversales verticales	TCAR 150x6
Vigas transversales horizontales	TCAR 120x5
Arriostramiento vertical	TCAR 180x3.6
Arriostramiento horizontal	TCAR 120x3.2
PESO	
52598,685 kg	

Tabla 8.4 - Material, perfiles y peso de la pluma

El código de letras TCAR se trata de la nomenclatura empleada por el programa para designar las secciones en forma de tubo cuadrado.

La imagen inferior muestra el modelo generado para la pluma en las condiciones anteriores:

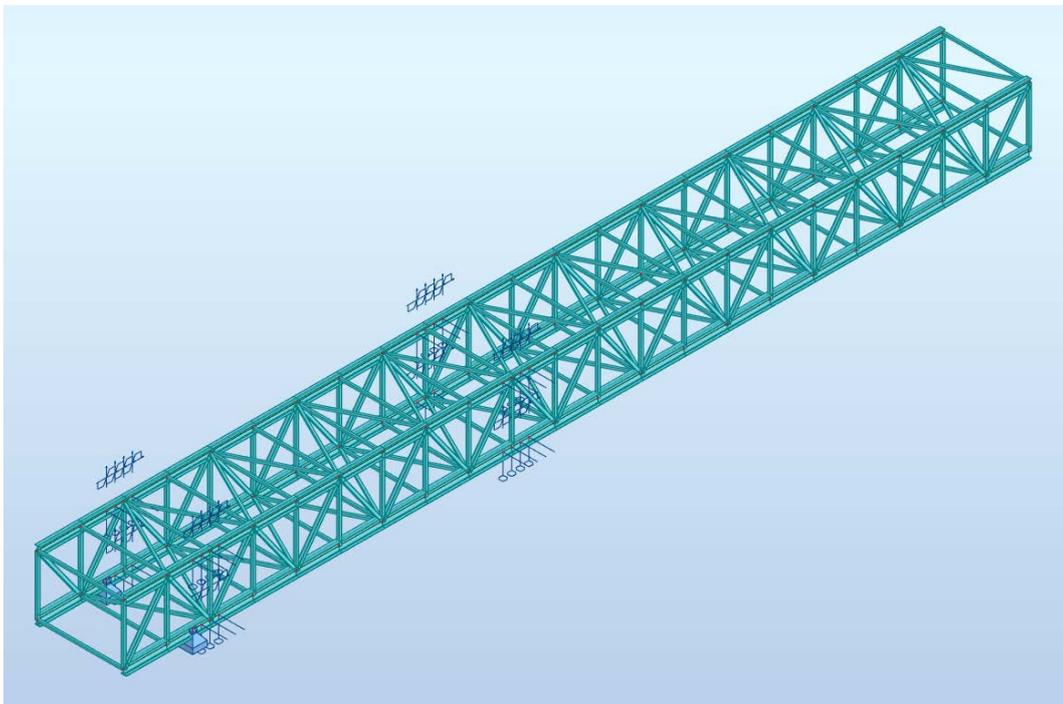
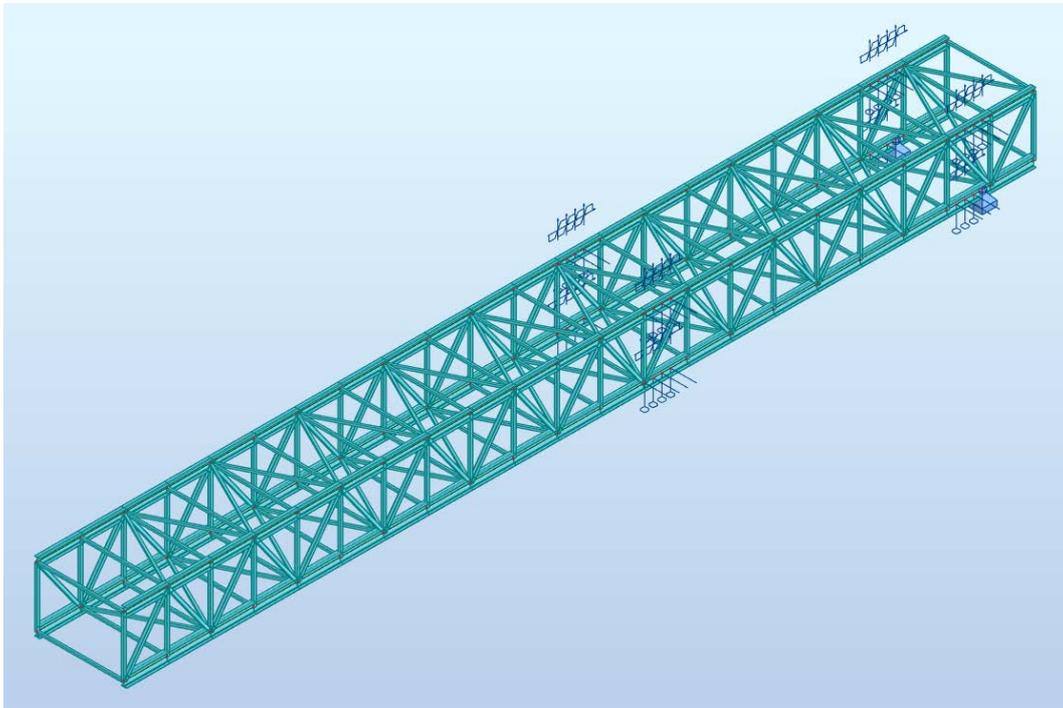


Figura 8.2 – Modelo de la pluma extendida y retraída

8.3.1.- Cálculo estático lineal

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis de tipo estático lineal, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída).

8.3.1.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis estático de la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS PLUMA							
PLUMA EXTENDIDA							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,7	4,6		0,2	0,004	0	0,002
Nudo	266	222		281	258	262	222
Caso	20	23		20	21	20	18
MIN	-1,2	-4,6	-15,1	-0,004	-0,005	-0,002	
Nudo	222	244		266	225	205	222
Caso	20	18		21	21	20	16
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	202,56	178,36	113,86	63,12	0	0	178,36
Barra	375	496	375	385	472	472	496
Nudo	278	212	278	245	200	200	212
Caso	20	20	21	23	1	1	20
MIN	-157,88	-187,64	0	0	-113,86	-63,12	-157,88
Barra	501	312	472	472	375	385	501
Nudo	258	234	200	200	278	245	258
Caso	21	23	1	1	21	23	21

Tabla 8.5 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en la pluma extendida

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 202,56 MPa, aproximadamente la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS PLUMA CASOS I Y II	
PLUMA EXTENDIDA CASO I	
114,99 MPa	
PLUMA EXTENDIDA CASO II	
187,35 MPa	

Tabla 8.6 – Valores máximos de tensión en la pluma extendida (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 114,99 MPa en el caso de carga I (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 187,35 MPa en el caso de carga II (aproximadamente la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z puede obtenerse la flecha máxima de la pluma:

$$\frac{15,1}{30,802 \cdot 10^2} = 4,90 \cdot 10^{-3} < \frac{1}{200} \quad (8.1)$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones de la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

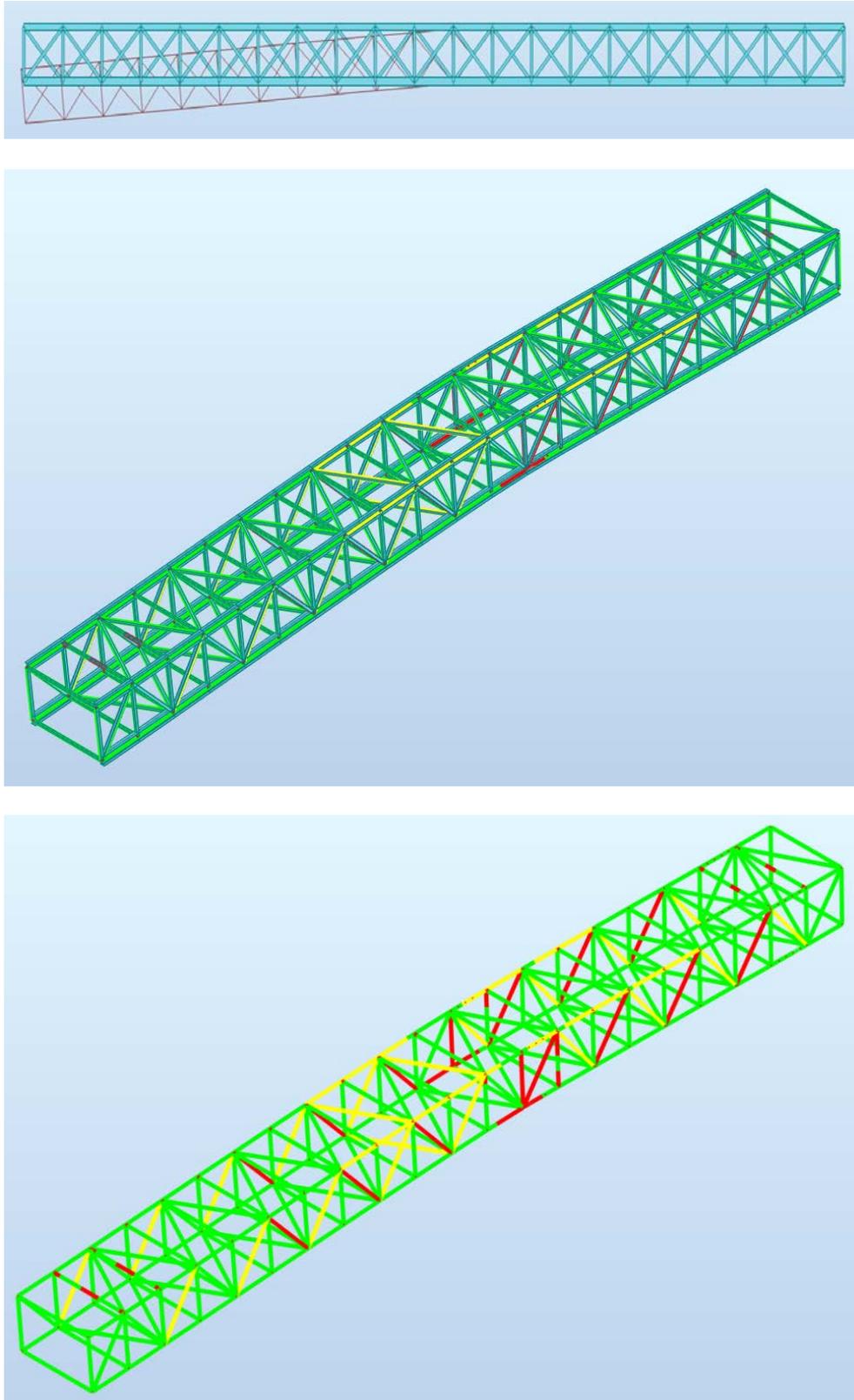


Figura 8.3 – Deformación y mapa de tensiones de la pluma extendida

8.3.1.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis estático de la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS PLUMA							
PLUMA RETRAÍDA							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,9	4	0,2	0,004	0,004	0,002	
Nudo	243	243	200	248	214	254	
Caso	23	16	23	21	23	16	
MIN	-0,6	-4	-10	-0,004	0	-0,002	
Nudo	287	265	221	226	244	254	
Caso	23	18	23	20	16	18	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	152,81	129,11	95,85	63,9	0	0	129,11
Barra	437	489	385	385	472	472	489
Nudo	312	308	223	245	200	200	308
Caso	23	22	20	23	1	1	22
MIN	-121,01	-153,04	0	0	-95,85	-63,9	-121,01
Barra	484	385	472	472	385	385	484
Nudo	229	245	200	200	223	245	229
Caso	23	20	1	1	20	23	23

Tabla 8.7 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en la pluma retraída

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 153,04 MPa, valor inferior a la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS PLUMA CASOS I Y II	
PLUMA RETRAÍDA CASO I	
95,1 MPa	
PLUMA RETRAÍDA CASO II	
-153,09 MPa	

Tabla 8.8 – Valores máximos de tensión en la pluma retraída (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 95,10 MPa en el caso de carga I (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 153,09 MPa en el caso de carga II (inferior a la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z puede obtenerse la flecha máxima de la pluma:

$$\frac{10}{29,750 \cdot 10^2} = 3,36 \cdot 10^{-3} < \frac{1}{200} \quad (8.2)$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones de la pluma retraída para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

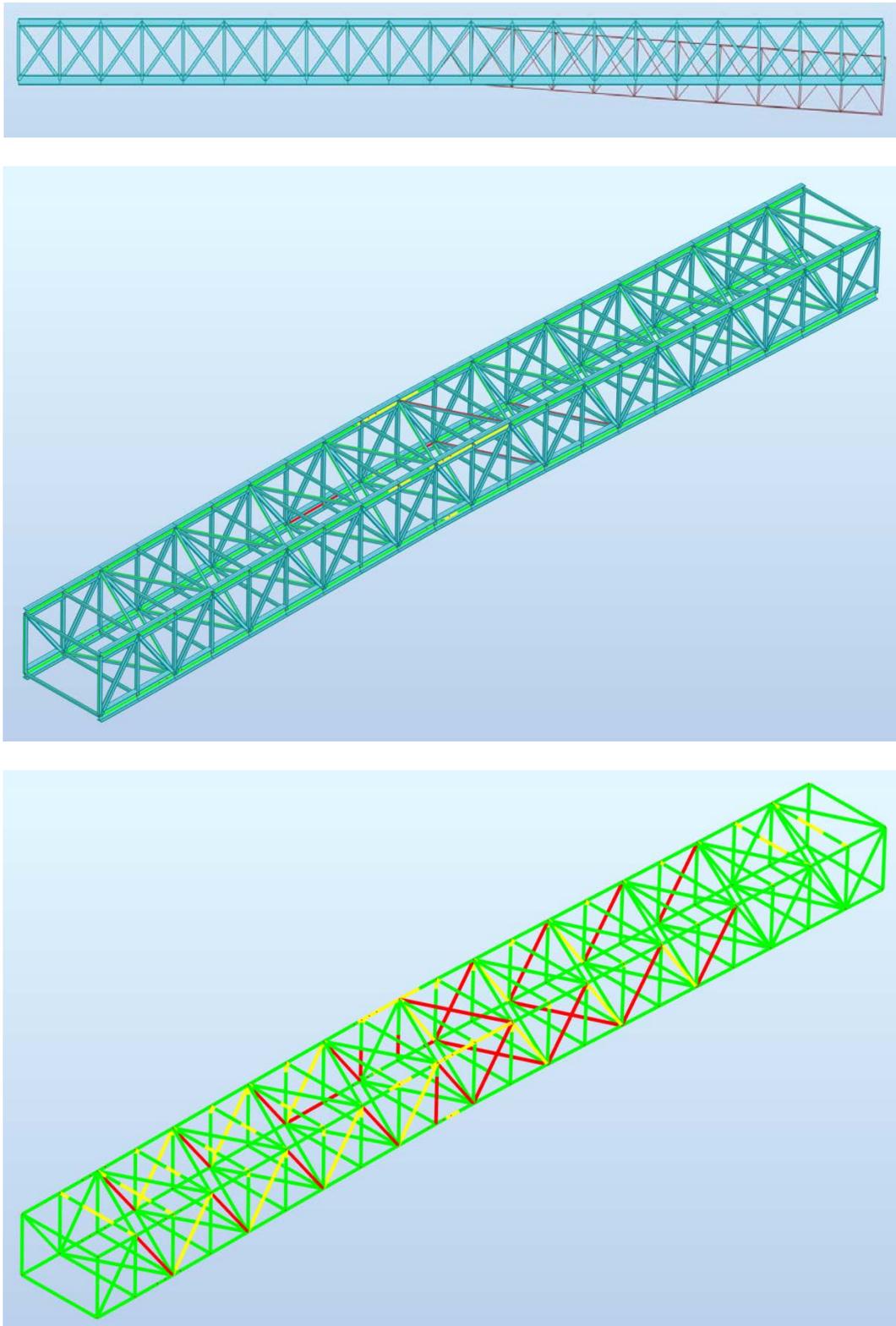


Figura 8.4 – Deformación y mapa de tensiones de la pluma retraída

8.3.2.- Cálculo a pandeo lineal

En segundo lugar, se llevará a cabo un análisis a pandeo lineal, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída) y diez modos de pandeo distintos.

8.3.2.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis a pandeo de la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
25/9	-6,41300e+01	6,68864e-03
25/8	-5,96548e+01	1,12905e-02
22/9	-5,43001e+01	5,56754e-03
24/9	-5,38810e+01	4,93098e-03
25/5	-5,32441e+01	9,22161e-03
22/8	-5,18961e+01	8,16547e-03
23/10	-5,13403e+01	4,37454e-03
24/8	-5,12966e+01	4,51787e-03
23/7	-4,64451e+01	6,12563e-03
22/5	-4,57480e+01	7,08997e-03
24/5	-4,52713e+01	4,11693e-03
23/4	-4,22429e+01	6,39424e-03
20/10	-4,20153e+01	7,40711e-03
20/9	-4,19365e+01	8,20515e-03
19/10	-4,15751e+01	8,62244e-03
21/9	-4,14523e+01	8,22489e-03
19/8	-3,87579e+01	8,18302e-03
21/8	-3,85927e+01	1,26985e-02
20/8	-3,76618e+01	1,32222e-02
19/5	-3,45518e+01	4,61222e-03
20/5	-3,45424e+01	9,92308e-03
21/5	-3,44178e+01	9,56571e-03
21/1	9,90172e+00	1,87540e-04
19/1	9,91481e+00	1,91436e-04
20/1	9,97993e+00	3,93530e-05
24/1	1,24137e+01	1,43446e-04

22/1	1,24551e+01	3,31830e-05
23/1	1,26762e+01	2,13574e-04
25/1	1,53156e+01	1,91083e-04
20/2	1,55481e+01	4,86284e-04
21/2	1,55744e+01	1,12346e-03
19/2	1,55895e+01	1,12278e-03
23/2	1,97358e+01	1,04424e-03
24/2	1,97916e+01	7,80206e-04
22/2	1,98348e+01	7,97600e-04
20/3	2,10052e+01	3,30787e-04
21/3	2,14779e+01	9,63373e-04
19/3	2,15013e+01	9,91195e-04
25/2	2,41321e+01	1,08927e-03
23/3	2,62373e+01	4,71645e-04
24/3	2,77483e+01	7,30163e-04
22/3	2,78211e+01	2,77552e-04
20/4	3,31991e+01	2,37443e-03
25/3	3,34053e+01	1,02444e-03
21/4	3,35723e+01	1,71941e-03
19/4	3,35778e+01	1,35661e-03
21/6	3,70293e+01	2,09267e-03
19/6	3,70779e+01	1,10936e-03
20/6	3,73330e+01	4,14351e-03
20/7	3,74526e+01	3,77906e-03
19/7	3,75944e+01	4,63501e-03
21/7	3,77349e+01	4,57566e-03
19/9	4,13225e+01	4,52813e-03
21/10	4,14992e+01	4,60551e-03
23/5	4,36157e+01	1,01742e-03
24/4	4,48039e+01	9,22474e-04
22/4	4,48343e+01	1,80232e-03
23/6	4,62469e+01	3,08710e-03
24/6	4,64686e+01	1,26489e-03
22/6	4,66112e+01	1,04086e-03
23/8	4,74432e+01	1,68456e-03
23/9	4,80322e+01	3,71882e-03
22/7	4,88907e+01	4,21118e-03
24/7	4,93796e+01	3,25488e-03
25/4	5,23533e+01	1,92990e-03
22/10	5,45381e+01	4,93204e-03
24/10	5,51589e+01	2,81974e-03
25/6	5,72667e+01	2,02900e-03
25/7	5,83953e+01	4,91083e-03
25/10	6,44189e+01	4,91581e-03

Tabla 8.9 – Coeficientes de pandeo para la pluma extendida

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 34,41 y 34,54. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en la pluma cuando esta se encuentra totalmente extendida.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

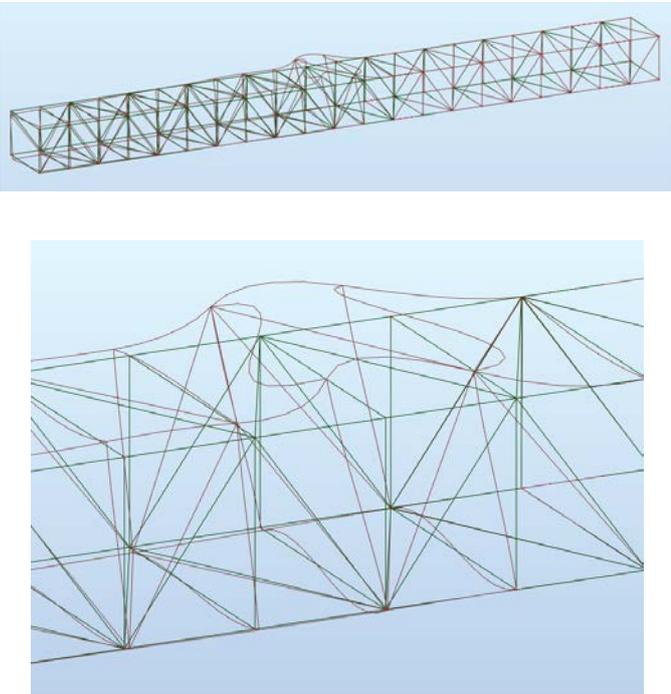
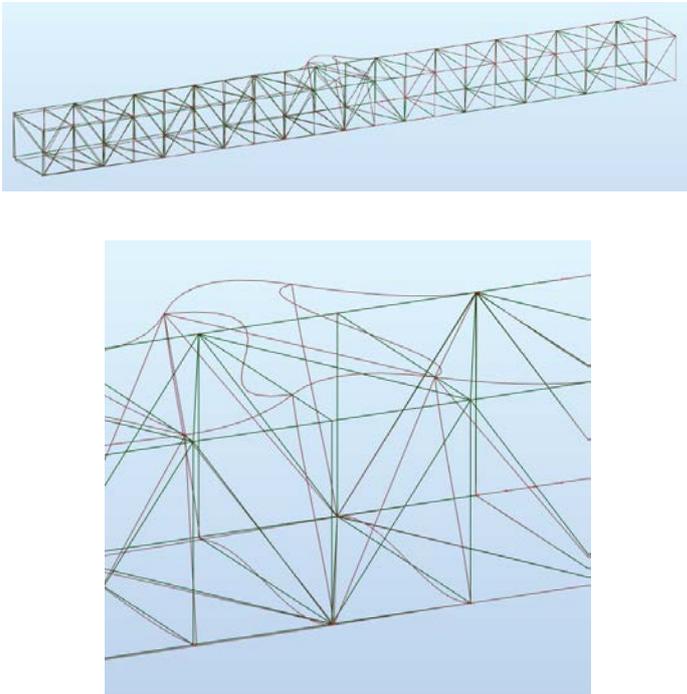
Caso 20 – Modo 5	Caso 21- Modo 5
	

Tabla 8.10 - Modos de pandeo de la pluma extendida

De acuerdo con las imágenes superiores, en caso de producirse el pandeo, se daría en las barras situadas en las inmediaciones de la zona de apoyo de la pluma sobre el cradle. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

8.3.2.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis a pandeo de la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
25/8	-9,40886e+01	8,84846e-04
25/6	-8,87347e+01	2,07256e-03
25/4	-7,88016e+01	2,84702e-04
24/10	-5,88504e+01	1,34720e-03
22/9	-5,83369e+01	1,12882e-03
21/8	-5,82812e+01	1,26896e-03
19/8	-5,80348e+01	1,16314e-03
23/10	-5,57399e+01	3,23149e-03
20/8	-5,53957e+01	5,11601e-03
24/7	-5,53811e+01	2,18535e-03
21/6	-5,50262e+01	2,03138e-03
22/6	-5,46939e+01	2,01207e-03
19/6	-5,46915e+01	1,95052e-03
20/7	-5,44527e+01	3,13715e-03
23/7	-5,00723e+01	1,59508e-03
24/4	-4,90953e+01	2,82700e-04
21/4	-4,87995e+01	2,60114e-04
22/4	-4,85488e+01	2,55530e-04
19/4	-4,85334e+01	2,46476e-04
20/4	-4,54060e+01	1,38488e-04
23/4	-4,15240e+01	7,63457e-05
23/1	1,45615e+01	2,79712e-13
20/1	1,46952e+01	4,26070e-13
22/1	1,47150e+01	1,45655e-13
24/1	1,47537e+01	1,35831e-13
19/1	1,47705e+01	1,55444e-13
21/1	1,47900e+01	1,49312e-13
22/2	2,17648e+01	1,31354e-10
24/2	2,18559e+01	1,26804e-10
19/2	2,18576e+01	1,34068e-10
21/2	2,19032e+01	1,31092e-10
23/2	2,19462e+01	3,52005e-10
20/2	2,20492e+01	1,02099e-09
25/1	2,39727e+01	1,54402e-13
22/3	2,44579e+01	3,67856e-10

24/3	2,45234e+01	3,72020e-10
19/3	2,45518e+01	3,91944e-10
21/3	2,45852e+01	3,92000e-10
23/3	2,46770e+01	2,14453e-09
20/3	2,47292e+01	1,94599e-09
25/2	3,54411e+01	1,42089e-10
25/3	3,99874e+01	3,86682e-10
23/5	4,64261e+01	9,40875e-05
23/6	4,99963e+01	2,12848e-04
20/5	5,13249e+01	4,02558e-04
23/8	5,24175e+01	8,76165e-04
24/5	5,27786e+01	5,22066e-04
21/5	5,30610e+01	6,43774e-04
19/5	5,33423e+01	7,72933e-04
22/5	5,33494e+01	7,51503e-04
20/6	5,39939e+01	8,94379e-04
23/9	5,47728e+01	3,35346e-03
22/7	5,47952e+01	4,43701e-04
24/6	5,49549e+01	4,32940e-04
19/7	5,50035e+01	4,76154e-04
21/7	5,50837e+01	4,63818e-04
20/9	5,63025e+01	1,52405e-03
20/10	5,71376e+01	2,19484e-03
22/8	5,79534e+01	1,77829e-03
19/9	5,81705e+01	1,91612e-03
24/8	5,82701e+01	1,46781e-03
21/9	5,83277e+01	1,73733e-03
24/9	5,88192e+01	2,86560e-03
21/10	5,91821e+01	3,41017e-03
19/10	5,95413e+01	3,98070e-03
22/10	5,95469e+01	3,91564e-03
25/5	8,66590e+01	7,69352e-04
25/7	8,92362e+01	4,53649e-04
25/9	9,56870e+01	2,26567e-03
25/10	9,70858e+01	4,65940e-03

Tabla 8.11 – Coeficientes de pandeo para la pluma retraída

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 14,70 y 14,56. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en la pluma cuando esta se encuentra totalmente retraída.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

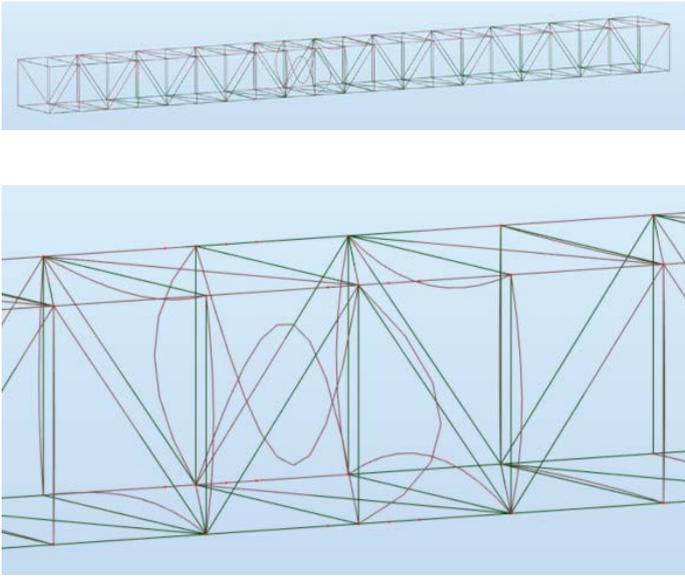
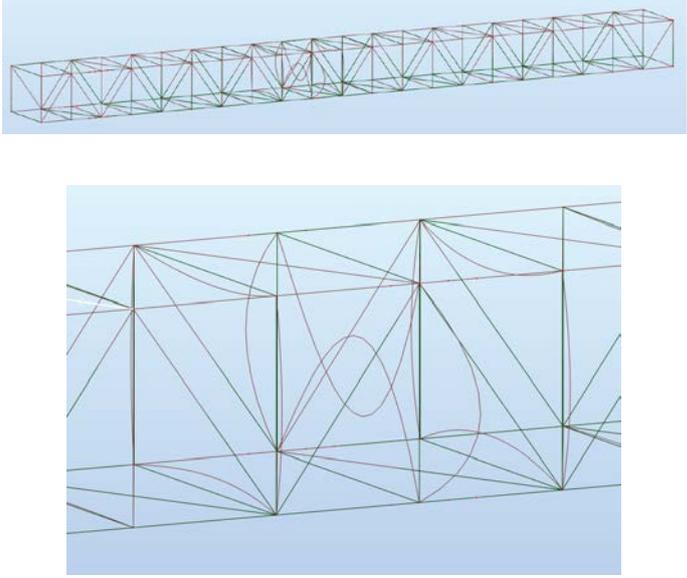
Caso 23 – Modo 1	Caso 20 – Modo 1
	

Tabla 8.12 - Modos de pandeo de la pluma retraída

De acuerdo con las imágenes superiores, en caso de producirse el pandeo, se daría en las barras situadas en las inmediaciones de la zona de apoyo de la pluma sobre el cradle. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

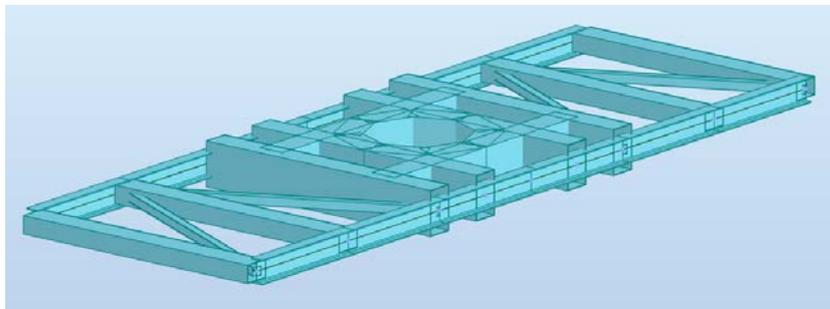
8.4.- MODELADO ALÁMBRICO DEL CRADLE

El modelo alámbrico del cradle fue definido siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

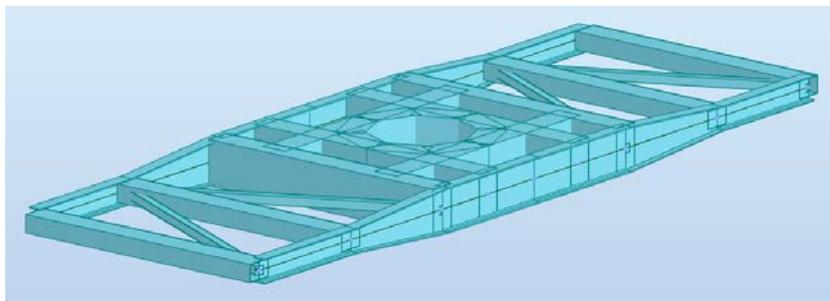
- **Nudos.** A partir de sus coordenadas, se definen los distintos nudos de forma que la estructura quede centrada en el plano XY y su parte inferior a una altura de 0 m.
- **Barras.** Se definen las barras existentes entre los distintos nudos como elementos de tipo viga. Posteriormente, se modifican las barras que conforman el arriostramiento de la estructura para que trabajen como elementos de tipo celosía.
- **Apoyos.** El cradle irá apoyado sobre la base a través del rodamiento axial que permite el movimiento de giro del cargador, lo cual se modela como un empotramiento de la parte inferior del cradle.
- **Material.** Se define el acero Fe 360 a partir de sus valores característicos.
- **Sección.** Se utilizarán perfiles del tipo HE para las vigas longitudinales y tubos de sección cuadrada o rectangular para las vigas verticales, horizontales y el arriostramiento.
- **Casos de carga y combinaciones.** Se definen las distintas cargas que actúan sobre el cradle, así como las combinaciones de estas que dan lugar a los casos de carga a tener en cuenta.
- **Tipo de análisis.** Se define el tipo de análisis a tener en cuenta. Se llevarán a cabo análisis de tipo estático y a pandeo lineales.

Una vez definido el modelo de la pluma, se realizará el dimensionamiento de las distintas barras de acero, lo cual puede resumirse en los siguientes puntos:

- **Grupos.** Se definen grupos con aquellas barras que vayan a tener una misma sección.
- **Dimensionamiento de los grupos.** Se dimensiona cada uno de los grupos definidos anteriormente buscando una optimización del peso de la estructura.
- **Verificación.** Se verifica el comportamiento de las distintas barras hasta que todas sean capaces de soportar los esfuerzos a los que son sometidas.
- **Resultados.** Se comprueban los resultados obtenidos hasta lograr que se cumplan las condiciones de flecha y tensión máximas.
- **Aspectos constructivos.** Se realizan las últimas modificaciones de los perfiles empleados para asegurar la continuidad desde un punto de vista constructivo, facilitando así la construcción del cradle y evitando la concentración de tensiones en los puntos de unión entre barras.



Perfiles inadecuados



Perfiles adecuados

Figura 8.5 – Aspectos constructivos considerados durante el diseño del cradle

Una vez finalizada la etapa de diseño, se tienen los perfiles y peso estructural mostrados a continuación:

CRADLE	
MATERIAL	
Acero FEM	Fe 360
PERFILES	
Vigas longitudinales superiores	HEA 300
Vigas longitudinales Inferiores	HEA 550 - HEA 1000
Vigas transversales verticales	RECT 400x600x10
Vigas transversales horizontales superiores	RECT 600x400x8
Vigas transversales horizontales inferiores 1	RECT 600x400x12
Vigas transversales horizontales inferiores 2	RECT 600x1000x12
Arriostramiento vertical	RECT 400x600x10
Arriostramiento horizontal	TCAR 200x5
Anillo superior	TCAR 300x12
Anillo inferior	RECT 600x1000x20
PESO	
72801,758 kg	

Tabla 8.13 - Material, perfiles y peso del cradle

El código de letras TCAR se trata de la nomenclatura empleada por el programa para designar las secciones en forma de tubo cuadrado, mientras que la nomenclatura RECT se refiere a las secciones en forma de tubo rectangular.

La imagen inferior muestra el modelo generado para el cradle en las condiciones anteriores:

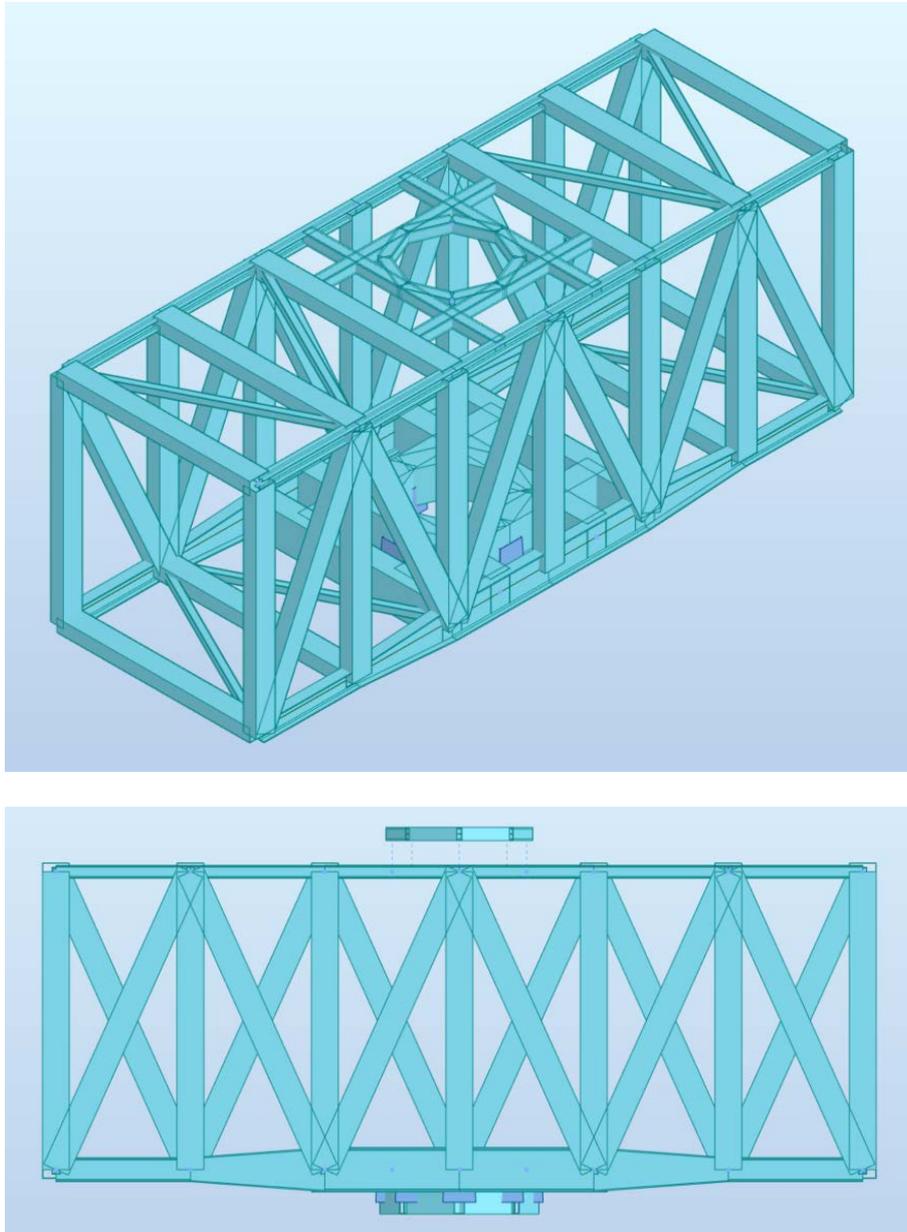


Figura 8.6 – Modelo del cradle

Como puede observarse, los anillos superior e inferior del cradle se modelarán como vigas circulares con un Offset de 1 m respecto a la zona de apoyo. La unión entre ambas partes trabaja como una unión completamente rígida.

8.4.1.- Cálculo estático lineal

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis de tipo estático, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída).

8.4.1.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis estático del cradle con la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS CRADLE							
PLUMA EXTENDIDA							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,3	4	2,8	0,004	0,001	0	
Nudo	46	31	39	49	43	48	
Caso	126	132 (C)	129 (C)	130 (C)	106	130 (C)	
MIN	-2,5	-0,3	-3,7	-0,005	-0,005	-0,001	
Nudo	31	50	16	1	17	52	
Caso	129 (C)	114	129 (C)	132 (C)	130 (C)	132 (C)	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	196,4	105,62	192,58	173,03	0	0	105,62
Barra	20	27	20	79	1	1	27
Nudo	27	1	27	3	1	1	1
Caso	129 (C)	132 (C)	130 (C)	132 (C)	104	104	132 (C)
MIN	-138,05	-200,65	0	0	-192,58	-173,03	-138,05
Barra	28	90	1	1	20	79	28
Nudo	17	16	1	1	27	3	17
Caso	132 (C)	132 (C)	104	104	130 (C)	132 (C)	132 (C)

Tabla 8.14 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en el cradle con la pluma extendida

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 200,65 MPa, aproximadamente el valor de la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS CRADLE CASOS I Y II	
PLUMA EXTENDIDA CASO I	
	132,27 MPa
PLUMA EXTENDIDA CASO II	
	182,87 MPa

Tabla 8.15 – Valores máximos de tensión en el cradle con la pluma extendida (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 132,27 MPa en el caso de carga I (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 182,87 MPa en el caso de carga II (aproximadamente la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z puede obtenerse la flecha máxima del cradle la pluma:

$$\frac{3,7}{7,5 \cdot 10^2} = 4,93 \cdot 10^{-3} < \frac{1}{200} \tag{8.3}$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones del cradle con la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

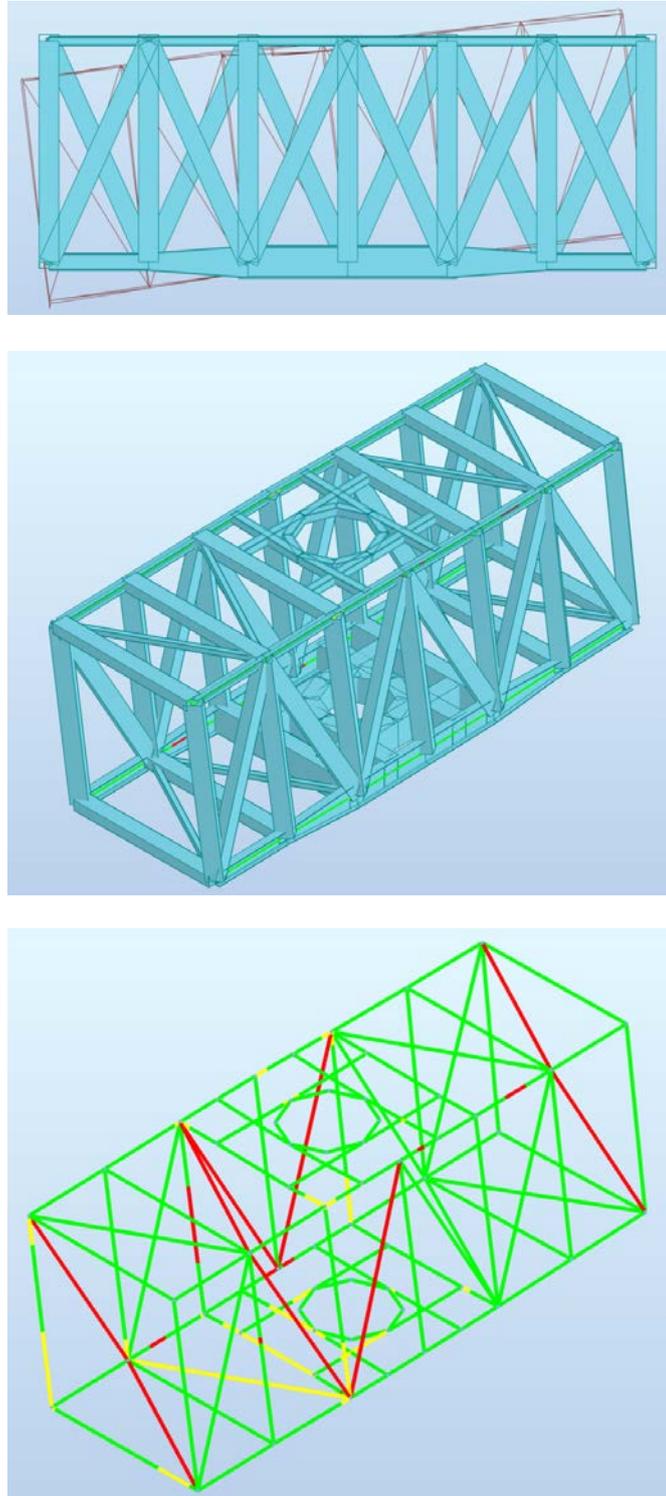


Figura 8.7 – Deformación y mapa de tensiones del cradle con la pluma extendida

8.4.1.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis estático del cradle con la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS CRADLE							
PLUMA RETRAÍDA							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	1,8	3,9	2	0,004	0,004	0,001	
Nudo	39	39	31	51	23	48	
Caso	132 (C)	132 (C)	132 (C)	128 (C)	131 (C)	132 (C)	
MIN	-0,3	-0,3	-2,7	-0,005	-0,001	0	
Nudo	54	50	24	9	45	52	
Caso	126	114	132 (C)	132 (C)	106	128 (C)	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	178,72	101,44	144,28	165,85	0	0	101,44
Barra	15	30	10	81	1	1	30
Nudo	23	23	14	7	1	1	23
Caso	132 (C)	132 (C)	132 (C)	132 (C)	104	104	132 (C)
MIN	-132,74	-189,09	0	0	-144,28	-165,85	-132,74
Barra	29	96	93	1	10	81	29
Nudo	7	24	20	1	14	7	7
Caso	132 (C)	132 (C)	101	104	132 (C)	132 (C)	132 (C)

Tabla 8.16 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en el cradle con la pluma retraída

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 189,09 MPa, valor inferior a la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS CRADLE CASOS I Y II	
PLUMA RETRAÍDA CASO I	
	-121,45 MPa
PLUMA RETRAÍDA CASO II	
	-149,17 MPa

Tabla 8.17 – Valores máximos de tensión en el cradle con la pluma retraída (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 121,45 MPa en el caso de carga I (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 149,17 MPa en el caso de carga II (inferior a la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z puede obtenerse la flecha máxima de la pluma:

$$\frac{2,7}{7,5 \cdot 10^2} = 3,60 \cdot 10^{-3} < \frac{1}{200} \tag{8.4}$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones del cradle con la pluma retraída para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

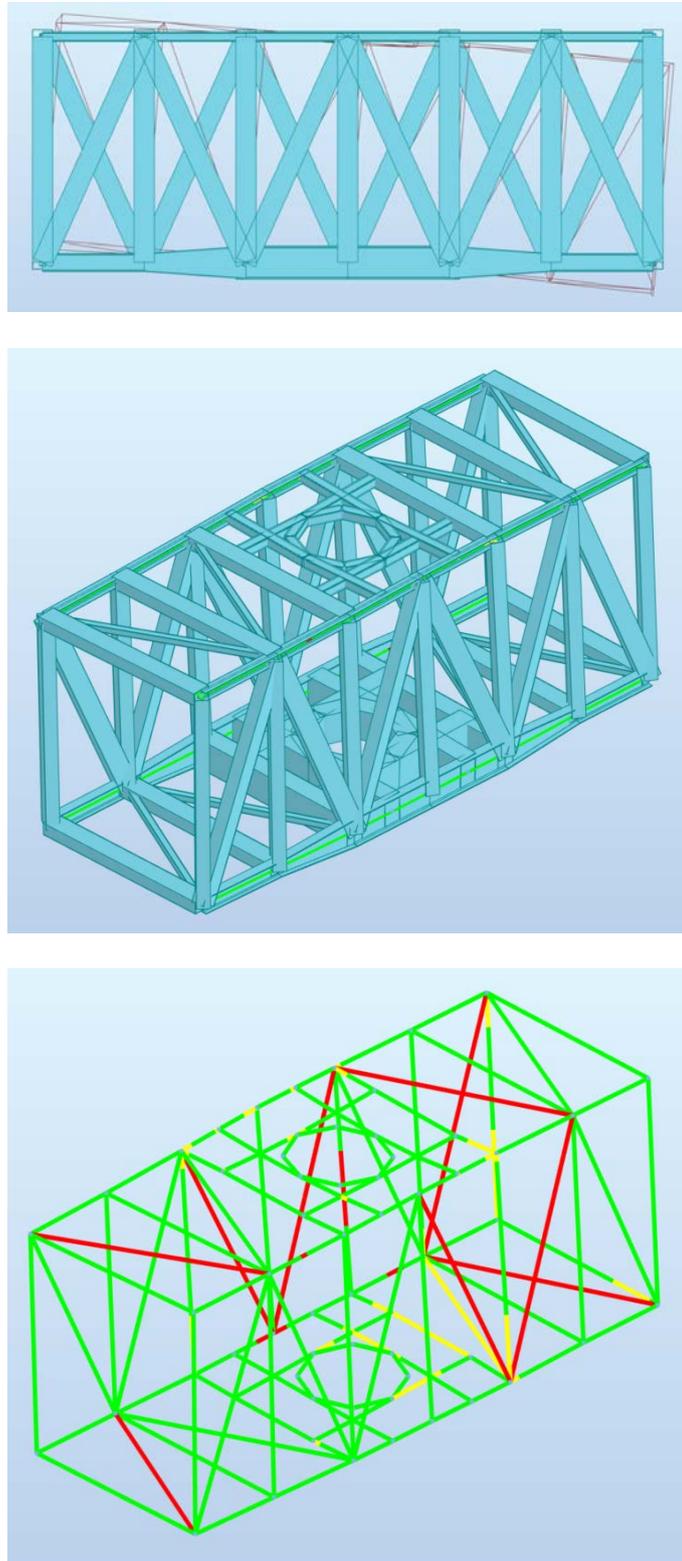


Figura 8.8 – Deformación y mapa de tensiones del cradle con la pluma retraída

8.4.2.- Cálculo a pandeo lineal

En segundo lugar, se llevará a cabo un análisis a pandeo lineal, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída) y diez modos de pandeo distintos.

8.4.2.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis a pandeo del cradle con la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
131/10	-2,82700e+02	3,44344e-03
134/10	-2,74105e+02	1,82481e-03
133/10	-2,72705e+02	1,82771e-03
134/9	-2,52765e+02	7,50508e-04
132/10	-2,45947e+02	7,28010e-03
134/7	-2,29601e+02	3,87106e-04
131/9	-2,26811e+02	1,37261e-05
133/9	-2,18786e+02	1,44795e-05
128/10	-2,17474e+02	7,83883e-04
130/10	-2,14540e+02	9,22796e-04
131/8	-2,05393e+02	5,92809e-06
132/9	-2,02898e+02	1,23453e-03
133/8	-2,02352e+02	1,35302e-05
129/9	-1,95811e+02	6,79129e-04
132/8	-1,89739e+02	1,83649e-04
128/9	-1,89190e+02	5,88621e-05
130/9	-1,86391e+02	6,32619e-05
131/7	-1,85594e+02	9,96556e-07
132/7	-1,83737e+02	1,80910e-04
133/7	-1,81674e+02	1,35450e-06
128/8	-1,69806e+02	4,33836e-05
130/8	-1,68778e+02	8,15889e-05
134/5	-1,68628e+02	1,47385e-05
129/8	-1,64353e+02	1,93603e-04
134/4	-1,60853e+02	1,45281e-05
134/3	-1,55919e+02	2,74395e-06

129/7	-1,52776e+02	1,59985e-04
128/7	-1,52582e+02	6,83268e-06
130/7	-1,51237e+02	9,77059e-06
132/4	-1,35534e+02	2,95030e-06
131/5	-1,34067e+02	4,81590e-09
133/5	-1,33994e+02	1,88771e-08
131/4	-1,28693e+02	1,38972e-09
133/4	-1,28336e+02	2,97587e-09
131/3	-1,26849e+02	5,15592e-10
133/3	-1,23927e+02	1,03388e-09
128/5	-1,23819e+02	7,55961e-07
130/5	-1,23808e+02	1,77058e-06
129/4	-1,12570e+02	3,17180e-06
132/3	-1,09740e+02	1,43321e-07
128/4	-1,08449e+02	1,98309e-08
130/4	-1,07507e+02	4,55873e-08
128/3	-1,06431e+02	3,44268e-08
130/3	-1,06154e+02	5,57998e-08
129/3	-1,00302e+02	3,32248e-06
129/2	-9,60110e+01	1,06910e-06
132/1	-8,17354e+01	2,04639e-09
129/1	8,69569e+01	2,74894e-07
128/1	8,81230e+01	1,26004e-09
130/1	8,82596e+01	4,52638e-09
128/2	9,07604e+01	1,16234e-08
130/2	9,07615e+01	3,60379e-08
132/2	9,60762e+01	1,78523e-08
131/1	1,02328e+02	8,19467e-12
133/1	1,02676e+02	7,50823e-11
131/2	1,03112e+02	3,53817e-11
133/2	1,03201e+02	6,72722e-11
134/1	1,13024e+02	1,20113e-07
134/2	1,13592e+02	7,05188e-08
129/5	1,27310e+02	2,06148e-04
130/6	1,29639e+02	1,49977e-06
129/6	1,30113e+02	1,03960e-04
128/6	1,31445e+02	9,26242e-07
133/6	1,59590e+02	1,48241e-07
132/5	1,60642e+02	9,01695e-05
131/6	1,65311e+02	1,23933e-07
132/6	1,68643e+02	5,52749e-05
134/6	1,88681e+02	2,43413e-05
129/10	2,08597e+02	6,96831e-03
134/8	2,37202e+02	2,16812e-03

Tabla 8.18 – Coeficientes de pandeo para el cradle con la pluma extendida

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 81,74 y 86,96. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en el cradle cuando la pluma se encuentra totalmente extendida.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

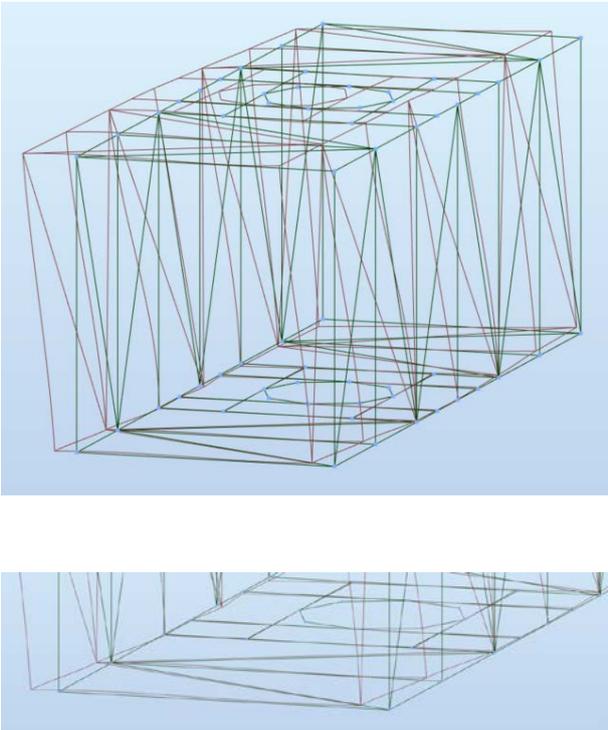
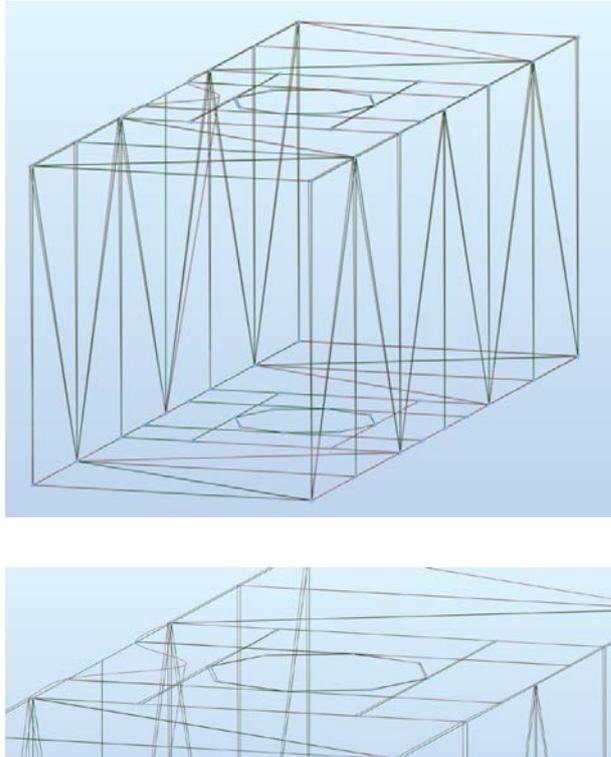
Caso 129 – Modo 1	Caso 132- Modo 1
	

Tabla 8.19 - Modos de pandeo del cradle con la pluma extendida

Contrariamente a lo observado en la pluma, cada modo de pandeo produciría un fallo en un punto distinto del cradle, sin seguir un patrón común. Por ello, en caso de producirse pandeo, la localización del fallo dependería de las condiciones de carga concretas.

8.4.2.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis a pandeo del cradle con la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
134/10	-3,59648e+02	4,96575e-03
134/9	-3,42853e+02	5,14787e-03
134/8	-3,02954e+02	1,36772e-03
132/10	-2,48267e+02	7,42544e-03
133/9	-2,44677e+02	3,27487e-04
130/10	-2,43091e+02	4,58124e-03
128/10	-2,38547e+02	3,72661e-03
131/9	-2,35391e+02	1,84354e-04
133/8	-2,22870e+02	5,74421e-05
130/9	-2,22026e+02	2,53096e-03
128/9	-2,20270e+02	2,84813e-03
131/8	-2,19293e+02	9,57771e-05
134/5	-2,18779e+02	1,42763e-04
129/9	-2,12848e+02	2,54629e-03
132/9	-2,05305e+02	1,56640e-03
132/8	-2,03855e+02	2,06746e-04
133/7	-1,98722e+02	5,18471e-06
132/7	-1,96535e+02	3,83080e-04
129/7	-1,95532e+02	3,16680e-04
130/7	-1,94554e+02	6,22250e-04
131/7	-1,94399e+02	5,44984e-06
128/7	-1,92538e+02	5,89604e-04
134/4	-1,91805e+02	1,00290e-05
134/3	-1,71208e+02	2,25470e-05
132/4	-1,45168e+02	1,12565e-05
129/5	-1,40079e+02	2,82143e-05
130/5	-1,39365e+02	1,86333e-05
128/5	-1,39278e+02	2,54059e-05
133/5	-1,39245e+02	2,49714e-08
131/5	-1,39032e+02	4,50187e-08
133/4	-1,35668e+02	3,68263e-08
131/4	-1,34486e+02	6,60292e-08
133/3	-1,33111e+02	1,93973e-08
130/4	-1,31671e+02	1,60700e-05
131/3	-1,30854e+02	2,18442e-09

128/4	-1,30151e+02	1,51129e-05
129/4	-1,28749e+02	2,39176e-05
130/3	-1,25142e+02	2,32677e-05
128/3	-1,25071e+02	2,18912e-05
132/3	-1,17978e+02	2,76326e-06
129/2	-9,69711e+01	1,37633e-06
132/1	-8,17819e+01	2,69207e-08
130/1	9,14390e+01	1,83502e-07
128/1	9,14392e+01	1,98882e-07
129/1	9,52772e+01	1,82459e-07
130/2	9,74648e+01	8,02922e-08
128/2	9,76322e+01	6,55373e-08
132/2	9,79246e+01	4,54286e-08
133/1	1,03073e+02	3,56314e-10
131/1	1,03077e+02	7,76243e-10
133/2	1,05506e+02	1,03702e-10
131/2	1,05983e+02	1,25701e-10
134/1	1,14366e+02	2,16316e-07
134/2	1,21072e+02	3,91836e-08
129/3	1,28705e+02	1,58778e-05
132/5	1,72912e+02	1,13807e-05
131/6	1,80289e+02	5,90255e-06
132/6	1,80395e+02	2,83445e-04
133/6	1,87637e+02	1,04193e-05
128/6	1,87944e+02	1,14515e-03
129/6	1,87994e+02	4,41784e-04
130/6	1,91783e+02	1,43467e-03
129/8	2,11564e+02	2,26348e-03
128/8	2,20092e+02	2,36237e-03
130/8	2,20093e+02	2,78462e-03
129/10	2,27265e+02	1,47915e-03
134/6	2,37539e+02	5,93064e-04
133/10	2,84601e+02	6,76717e-03
131/10	2,84605e+02	1,05875e-02
134/7	2,84827e+02	3,38312e-03

Tabla 8.20 – Coeficientes de pandeo para el cradle con la pluma retraída

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 81,78 y 91,44. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en el cradle cuando la pluma se encuentra totalmente retraída.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

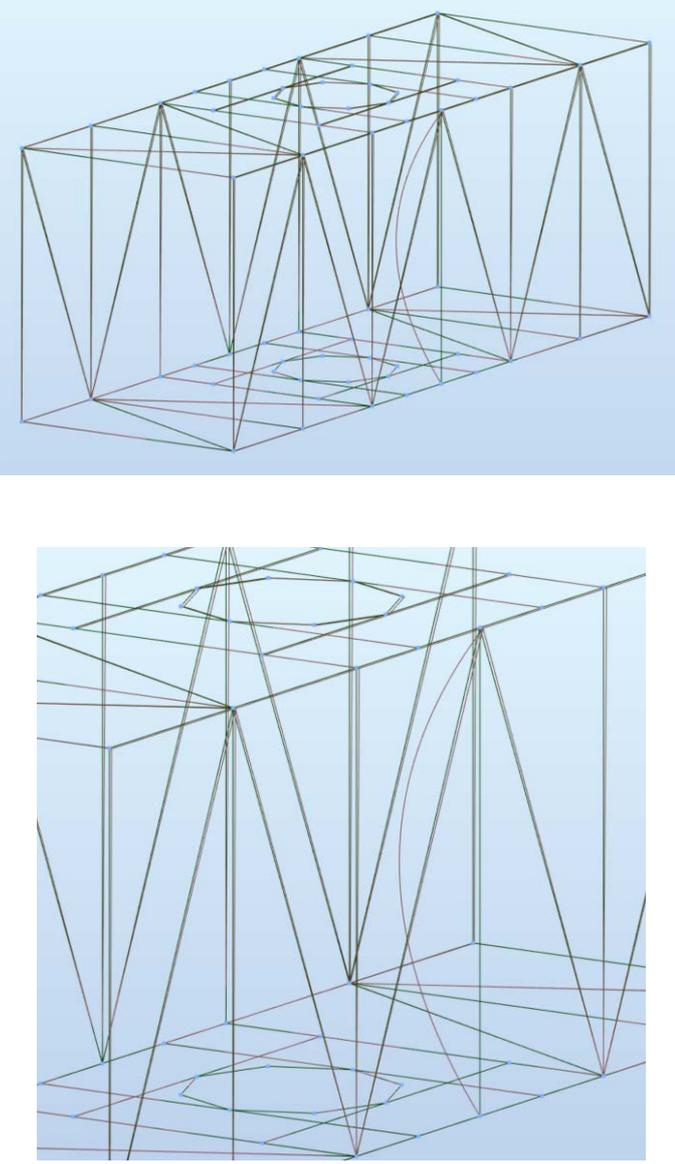
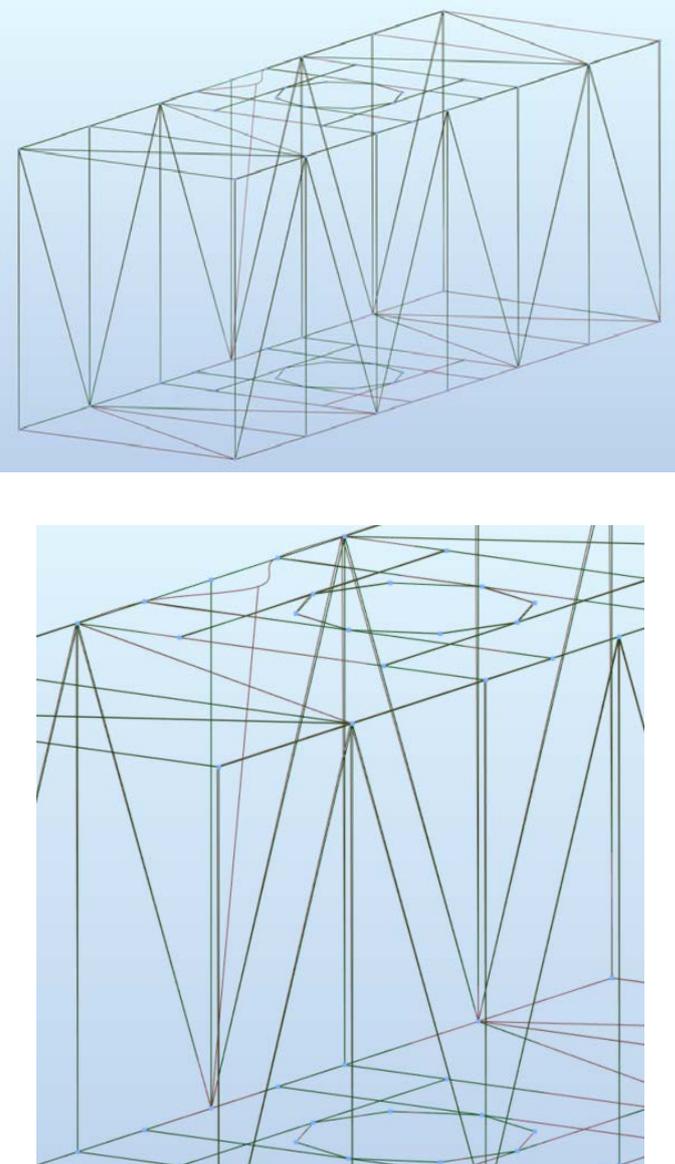
Caso 130 – Modo 1	Caso 132 – Modo 1
	

Tabla 8.21 - Modos de pandeo del cradle con la pluma retraída

Contrariamente a lo observado en la pluma, cada modo de pandeo produciría un fallo en un punto distinto del cradle, sin seguir un patrón común. Por ello, en caso de producirse pandeo, la localización del fallo dependería de las condiciones de carga concretas.

8.5.- MODELADO ALÁMBRICO DE LA BASE Y DE LA TORRE

El modelo alámbrico de la base y la torre fue definido siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- **Nudos.** A partir de sus coordenadas, se definen los distintos nudos de forma que la estructura quede centrada en el plano XY y su parte inferior a una altura de -6,5 m.
- **Barras.** Se definen las barras existentes entre los distintos nudos como elementos de tipo viga. Posteriormente, se modifican las barras que conforman el arriostramiento de la estructura para que trabajen como elementos de tipo celosía.
- **Apoyos.** La torre estará anclada a tierra firme a través de cuatro pilares, lo cual se modela como un empotramiento de la parte inferior de los mismos.
- **Material.** Se define el acero Fe 360 a partir de sus valores característicos.
- **Sección.** Se utilizarán tubos de sección rectangular para la base y tubos de sección cuadrada para los pilares y el arriostramiento.
- **Casos de carga y combinaciones.** Se definen las distintas cargas que actúan sobre la base y la torre, así como las combinaciones de estas que dan lugar a los casos de carga a tener en cuenta.
- **Tipo de análisis.** Se define el tipo de análisis a tener en cuenta. Se llevará a cabo un análisis de tipo estático lineal.

Una vez definido el modelo de la base y la torre, se realizará el dimensionamiento de las distintas barras de acero, lo cual puede resumirse en los siguientes puntos:

- **Grupos.** Se definen grupos con aquellas barras que vayan a tener una misma sección.
- **Dimensionamiento de los grupos.** Se dimensiona cada uno de los grupos definidos anteriormente buscando una optimización del peso de la estructura.
- **Verificación.** Se verifica el comportamiento de las distintas barras hasta que todas sean capaces de soportar los esfuerzos a los que son sometidas.
- **Resultados.** Se comprueban los resultados obtenidos hasta lograr que se cumplan las condiciones de flecha y tensión máximas.

Una vez finalizada la etapa de diseño, se tienen los perfiles y peso estructural mostrados a continuación:

BASE Y TORRE	
MATERIAL	
Acero FEM	Fe 360
PERFILES	
Base	RECT 600X1500X20
Pilares	TCAR 300X10
Arriostramiento	TCAR 250X8
PESO	
51456,12 kg	

Tabla 8.22 - Material, perfiles y peso de la base y la torre

El código de letras TCAR se trata de la nomenclatura empleada por el programa para designar las secciones en forma de tubo cuadrado, mientras que la nomenclatura RECT se refiere a las secciones en forma de tubo rectangular.

La imagen inferior muestra el modelo generado para la base y la torre en las condiciones anteriores:

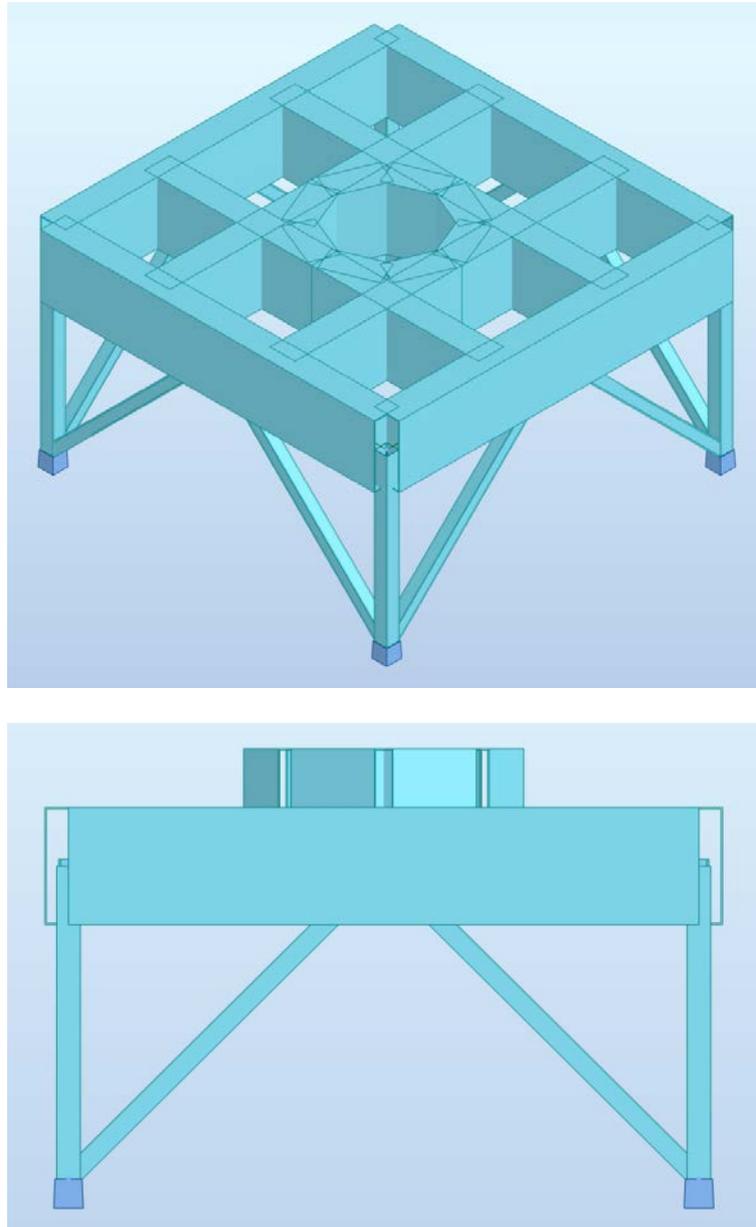


Figura 8.9 – Modelo de la base y la torre

Como puede observarse, el anillo de la base se modelará como una viga circular con un Offset de 1,5 m respecto a la zona de apoyo. La unión entre ambas partes trabaja como una unión completamente rígida.

8.5.1.- Cálculo estático lineal

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis de tipo estático, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída) cuando esta se encuentra posicionada a 0 °, 45 ° y 90 °.

8.5.1.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis estático de la base y la torre con la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS BASE Y TORRE							
PLUMA EXTENDIDA 0							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,1	0,3	0,2	0,001	0,001	0,001	
Nudo	521	504	513	517	514	525	
Caso	304 (C)	304 (C)	21 (C)	302 (C)	304 (C)	18	
MIN	-0,1	-0,2	-0,5	-0,001	-0,001	-0,001	
Nudo	508	504	524	504	525	525	
Caso	304 (C)	18	302 (C)	301 (C)	302 (C)	23 (C)	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	183,89	183,89	135,12	61,61	0	0	183,89
Barra	710	710	719	702	700	700	710
Nudo	502	502	524	517	504	504	502
Caso	304 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-68,88	-130,67	0	0	-135,12	-61,61	-68,88
Barra	707	719	700	700	719	702	707
Nudo	513	524	504	504	524	517	513
Caso	20 (C)	301 (C)	104	104	301 (C)	304 (C)	20 (C)

PLUMA EXTENDIDA 45							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,2	0,4		0,2	0,001	0,001	0,001
Nudo	504	517		507	518	517	523
Caso	18	304 (C)		20 (C)	302 (C)	301 (C)	18
MIN	-0,2	-0,3		-0,6	-0,001	-0,002	-0,001
Nudo	504	517		526	514	522	523
Caso	304 (C)	18		301 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	191,56	160,79	179,81	45,39	0	0	160,79
Barra	719	708	719	702	700	700	708
Nudo	524	503	524	517	504	504	503
Caso	301 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-79,72	-186,18	0	0	-179,81	-45,39	-84,79
Barra	701	719	700	700	719	702	701
Nudo	501	524	504	504	524	517	508
Caso	19 (C)	301 (C)	104	104	301 (C)	304 (C)	21 (C)
PLUMA EXTENDIDA 90							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,1	0,3		0,2	0,001	0	0,001
Nudo	521	517		513	517	514	525
Caso	16	304 (C)		21 (C)	301 (C)	304 (C)	18
MIN	-0,2	-0,2		-0,5	-0,001	-0,002	-0,001
Nudo	508	504		524	504	510	525
Caso	304 (C)	18		301 (C)	301 (C)	301 (C)	23 (C)
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	182,18	182,18	137,15	59,98	0	0	182,18
Barra	710	710	719	702	700	700	710
Nudo	502	502	524	517	504	504	502
Caso	304 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-68,88	-133	0	0	-137,15	-59,98	-68,88
Barra	707	719	700	700	719	702	707
Nudo	513	524	504	504	524	517	513
Caso	20 (C)	301 (C)	104	104	301 (C)	304 (C)	20 (C)

Tabla 8.23 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en la base y la torre con la pluma extendida

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 191,56 MPa cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °, valor inferior a la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS BASE Y TORRE CASOS I Y II	
PLUMA EXTENDIDA 0 CASO I	
104,97 MPa	
PLUMA EXTENDIDA 0 CASO II	
162,81 MPa	
PLUMA EXTENDIDA 45 CASO I	
127,53 MPa	
PLUMA EXTENDIDA 45 CASO II	
180,69 MPa	
PLUMA EXTENDIDA 90 CASO I	
104,97 MPa	
PLUMA EXTENDIDA 90 CASO II	
162,8 MPa	

Tabla 8.24 – Valores máximos de tensión en la base y la torre con la pluma extendida (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 127,53 MPa en el caso de carga I cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 ° (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 180,69 MPa en el caso de carga II cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 ° (aproximadamente la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z (cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °) puede obtenerse la flecha máxima del cradle la pluma:

$$\frac{0,6}{8 \cdot 10^2} = 7,50 \cdot 10^{-4} < \frac{1}{200} \quad (8.5)$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones de la base y la torre con la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

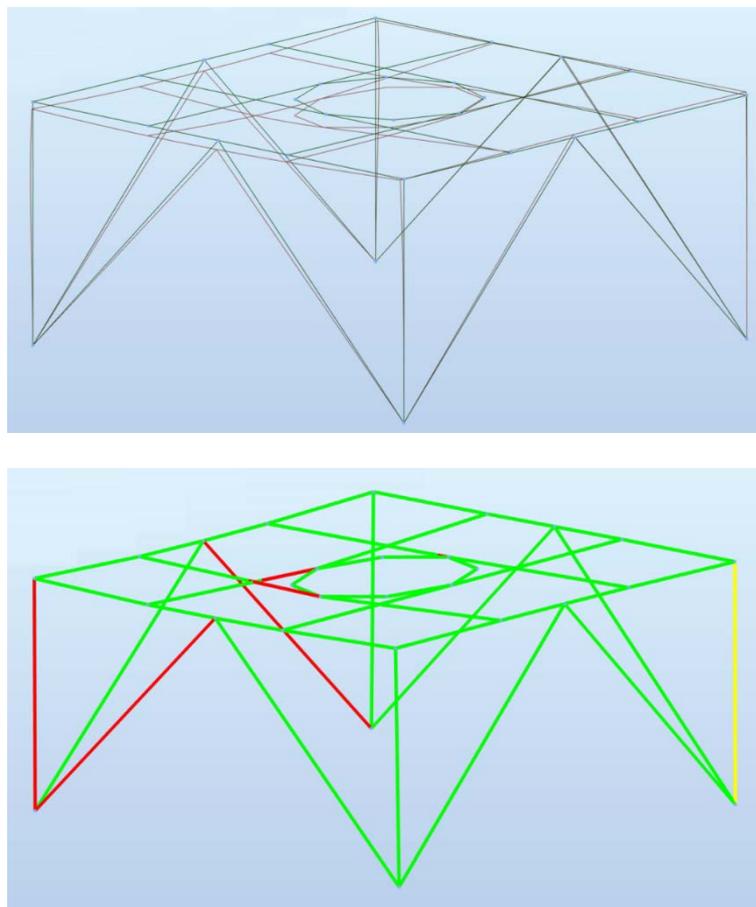


Figura 8.10 – Deformación y mapa de tensiones de la base y la torre con la pluma extendida

8.5.1.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis estático de la base y la torre con la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS Y TENSIONES MÁXIMOS BASE Y TORRE							
PLUMA RETRAÍDA 0							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,1	0,3	0,2	0,001	0,001	0	
Nudo	504	508	512	520	524	524	
Caso	304 (C)	304 (C)	22 (C)	300 (C)	303 (C)	304 (C)	
MIN	-0,1	-0,2	-0,4	-0,001	-0,001	0	
Nudo	517	521	527	508	516	524	
Caso	16	18	304 (C)	304 (C)	304 (C)	18	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	170,75	170,75	118,73	57,29	0	0	170,75
Barra	707	707	721	703	700	700	707
Nudo	503	503	525	521	504	504	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-53,78	-110,67	0	0	-118,73	-57,29	-53,78
Barra	710	721	700	700	721	703	710
Nudo	502	525	504	504	525	521	502
Caso	23 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	23 (C)
PLUMA RETRAÍDA 45							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,2	0,3	0,1	0,001	0,001	0,001	
Nudo	504	508	514	521	522	526	
Caso	304 (C)	304 (C)	23 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	
MIN	-0,2	-0,2	-0,5	-0,001	-0,001	-0,001	
Nudo	504	508	523	507	508	526	
Caso	18	18	304 (C)	304 (C)	304 (C)	18	

	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	172,84	150,49	151,15	51,89	0	0	150,49
Barra	714	707	714	703	700	700	707
Nudo	510	503	510	521	504	504	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-53,89	-162,97	0	0	-151,15	-51,89	-57,56
Barra	702	714	700	700	714	703	702
Nudo	502	510	504	504	510	521	517
Caso	24 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	22 (C)
PLUMA RETRAÍDA 90							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,2	0,3	0,2	0,001	0,001	0	
Nudo	504	521	512	521	510	524	
Caso	304 (C)	304 (C)	22 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	
MIN	-0,1	-0,2	-0,4	-0,001	0	0	
Nudo	517	521	525	508	516	524	
Caso	16	18	304 (C)	304 (C)	301 (C)	18	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	169,03	169,03	122,89	55,66	0	0	169,03
Barra	707	707	721	703	700	700	707
Nudo	503	503	525	521	504	504	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-53,78	-115,43	0	0	-122,89	-55,66	-53,78
Barra	710	721	700	700	721	703	710
Nudo	502	525	504	504	525	521	502
Caso	23 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	23 (C)

Tabla 8.25 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en la base y la torre con la pluma retraída

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 172,84 MPa cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °, valor inferior a la tensión máxima de 200 MPa impuesta para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales).

Por otro lado, si se obtiene la tensión máxima para los casos de carga I (cargas principales) y II (combinación de cargas principales y adicionales) se tiene lo siguiente:

TENSIONES MÁXIMAS BASE Y TORRE CASOS I Y II	
PLUMA RETRAÍDA 0 CASO I	
83,35 MPa	
PLUMA RETRAÍDA 0 CASO II	
141,09 MPa	
PLUMA RETRAÍDA 45 CASO I	
96,49 MPa	
PLUMA RETRAÍDA 45 CASO II	
148,43 MPa	
PLUMA RETRAÍDA 90 CASO I	
83,35 MPa	
PLUMA RETRAÍDA 90 CASO II	
141,08 MPa	

Tabla 8.26 – Valores máximos de tensión en la base y la torre con la pluma retraída (casos de carga I y II)

De acuerdo a la tabla superior, el máximo valor absoluto de la tensión es de 96,49 MPa en el caso de carga I cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 ° (inferior a la tensión máxima de 160 MPa impuesta) y de 148,43 MPa en el caso de carga II cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 ° (inferior a la tensión máxima de 180 MPa impuesta).

A partir del máximo desplazamiento en el sentido negativo del eje Z (cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °) puede obtenerse la flecha máxima del cradle la pluma:

$$\frac{0,5}{8 \cdot 10^2} = 6,25 \cdot 10^{-4} < \frac{1}{200} \quad (8.6)$$

Como puede observarse, la flecha máxima es inferior al valor límite impuesto en los criterios de diseño.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones de la base y la torre con la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

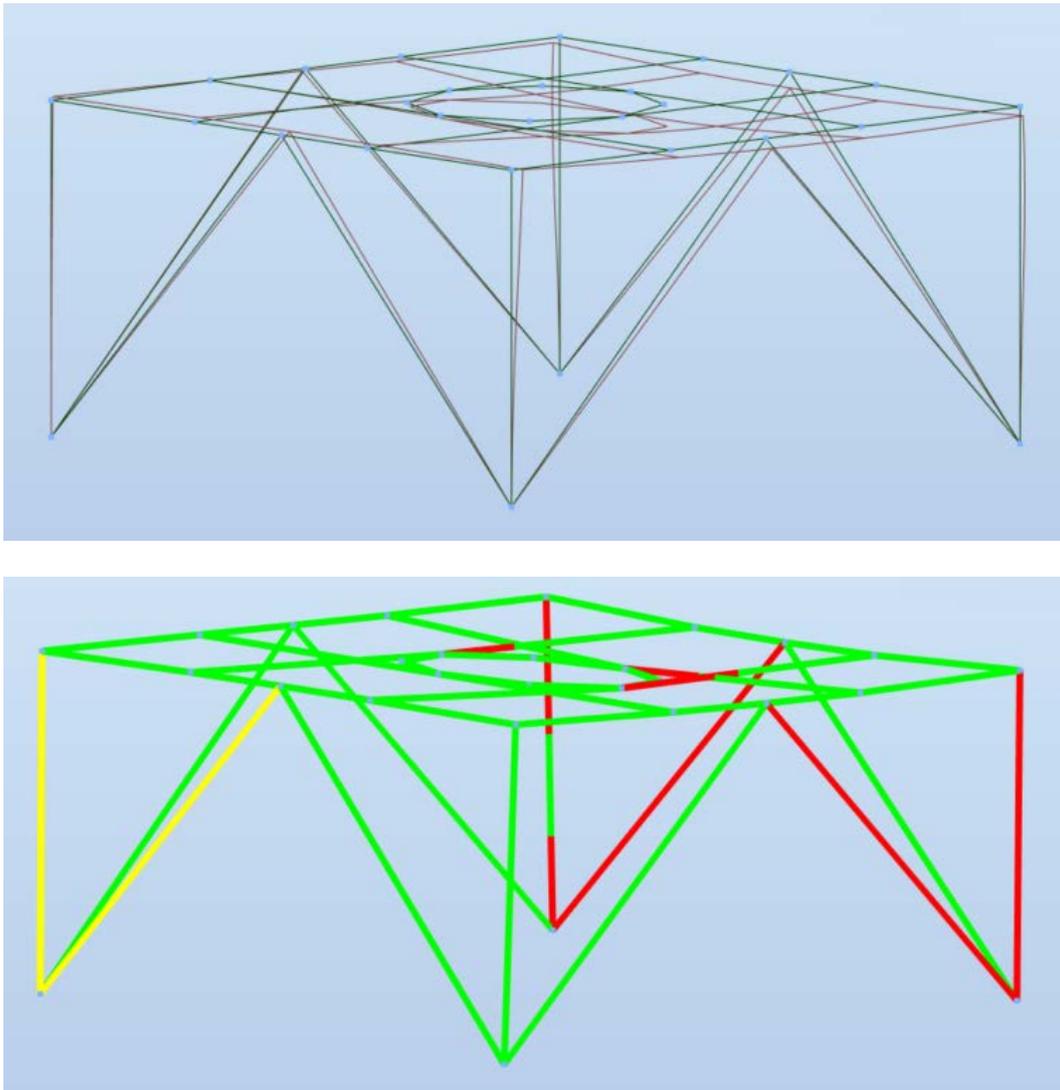


Figura 8.11 – Deformación y mapa de tensiones de la base y la torre con la pluma retraída

8.5.2.- Cálculo a pandeo lineal

A partir del cálculo estático del cargador completo, es posible aplicar un filtro por barras, nudos sobre los resultados para obtener las tensiones y deformaciones experimentadas por la base y la torre. Sin embargo, no es posible realizar un cálculo a pandeo sobre una determinada parte de la estructura a partir de un modelo completo de la misma.

El cálculo a pandeo lineal del cargador completo resulta ser satisfactorio y, en caso de producirse el pandeo (de acuerdo a lo indicado en el apartado 8.6.2.-), este se daría antes sobre la pluma que sobre los pilares de la torre.

De todas formas, se llevará a cabo un cálculo a pandeo lineal sobre la base y la torre posteriormente en ANSYS, donde se comprobará como efectivamente los pilares de la torre no sufren pandeo. Tal y como se puede observar en apartado 12.3.5.-, este cálculo será realizado para la posición del cargador más desfavorable para la torre, es decir, con la pluma totalmente extendida en una posición de 45° (el mayor esfuerzo es soportado por solo uno de los pilares).

8.6.- MODELO ALÁMBRICO DEL CARGADOR

El modelo alámbrico completo del cargador fue definido siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- **Importar.** Se importan los modelos de la pluma, el cradle, la base y la torre definidos previamente. La designación de los nudos, las barras, los casos de carga y sus combinaciones debe ser exclusiva para cada modelo, de forma que cuando estos se combinen en un modelo único no se produzcan solapamientos ni pérdidas de información.
- **Nudos.** A partir de sus coordenadas, se definen los distintos nudos necesarios para modelar la unión de los distintos modelos entre sí.
- **Apoyos.** Los apoyos definidos sobre la torre permanecen inalterados, mientras que los apoyos definidos sobre la pluma y sobre el cradle se sustituyen por uniones rígidas para transmitir los esfuerzos de un modelo a otro. El apoyo del cradle sobre la base se modela mediante uniones rígidas del tipo empotramiento-empotramiento. El apoyo de la pluma sobre el cradle se modela mediante uniones rígidas del tipo empotramiento-articulación móvil para permitir el movimiento de la pluma en la dirección X y una unión rígida del tipo empotramiento-articulación fija para evitar la inestabilidad de la estructura.
- **Casos de carga y combinaciones.** Se eliminan los casos de carga de la pluma sobre el cradle, ya que dichos esfuerzos se transmiten a través de las uniones rígidas definidas previamente. Finalmente, se definen las combinaciones necesarias para agrupar los casos de carga correspondientes de cada modelo.
- **Tipo de análisis.** Se define el tipo de análisis a tener en cuenta. Se llevarán a cabo análisis de tipo estático y a pandeo lineales.

Una vez definido el modelo completo del cargador, se realizarán las comprobaciones resumidas en los siguientes puntos:

- **Verificación.** Se verifica el comportamiento de las distintas barras, comprobando que todas sean capaces de soportar los esfuerzos a los que son sometidas.
- **Resultados.** Se analizan los resultados obtenidos, comprobando que se cumplan las condiciones de flecha y tensión máximas.

Una vez finalizado el ensamblaje de los distintos modelos, el peso estructural resultante es el mostrado a continuación:

CARGADOR	
MATERIAL	
Acero FEM	Fe 360
PESO	
176856,563 kg	

Tabla 8.27 - Material y peso del cargador

La imagen inferior muestra el modelo generado para el cargador en las condiciones anteriores:

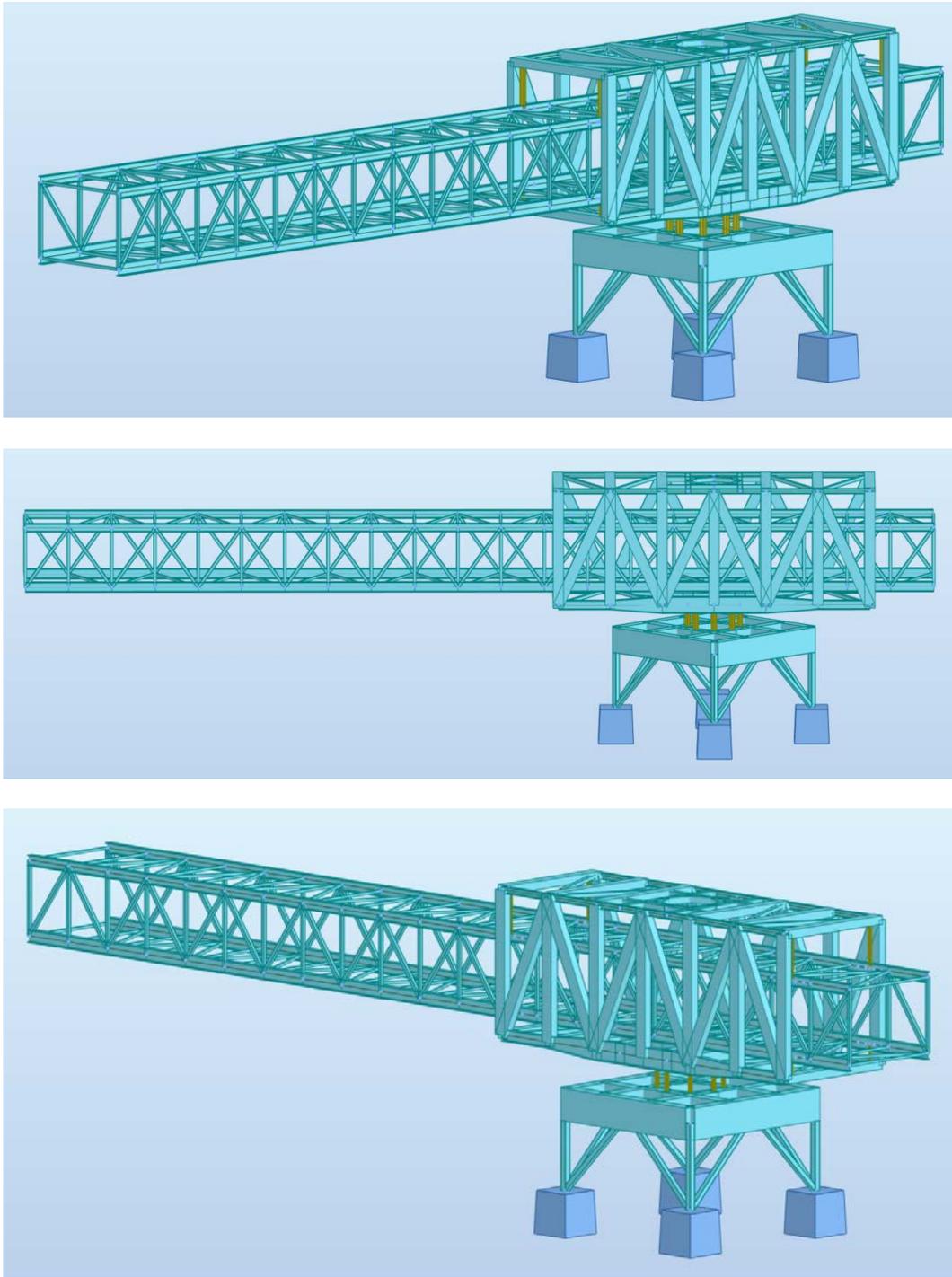


Figura 8.12 – Modelo del cargador (pluma extendida)

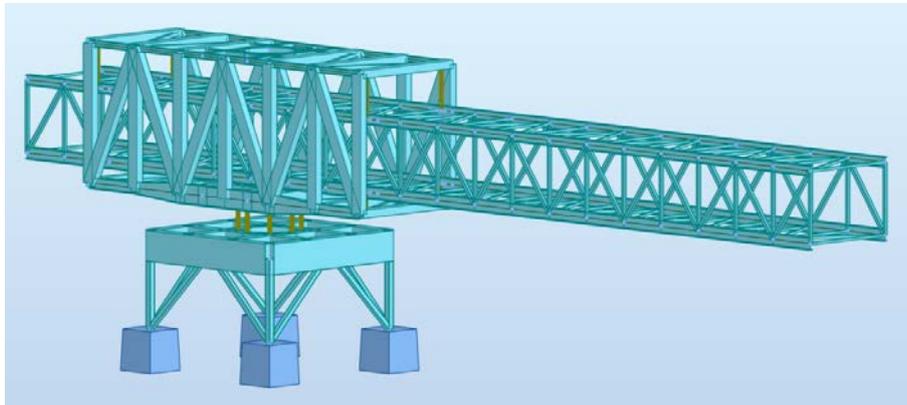
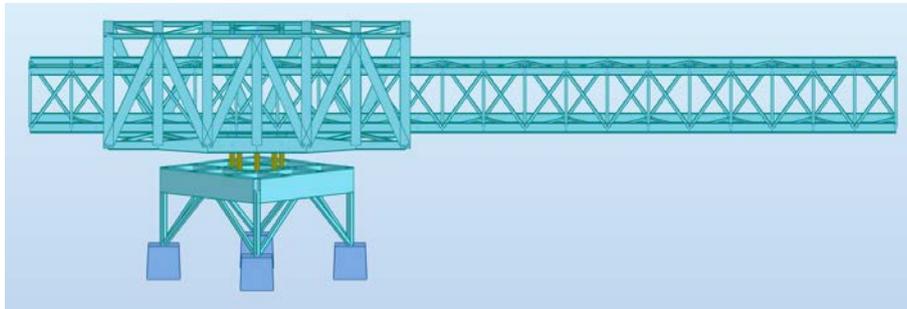
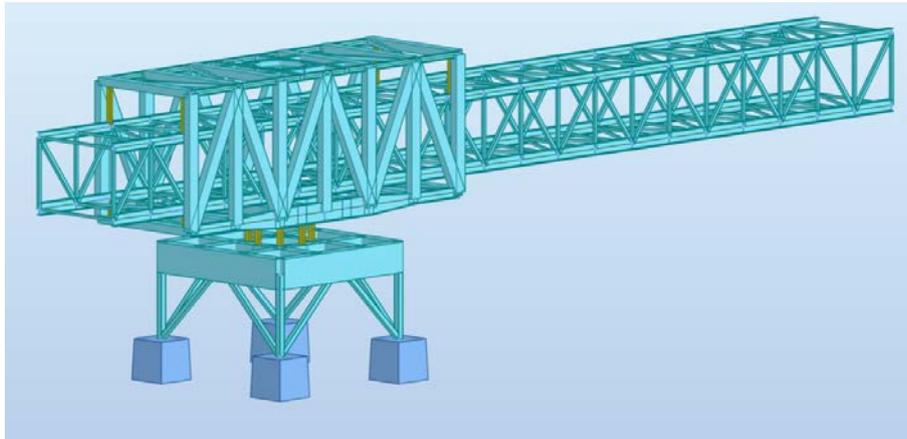


Figura 8.13 – Modelo del cargador (pluma retraída)

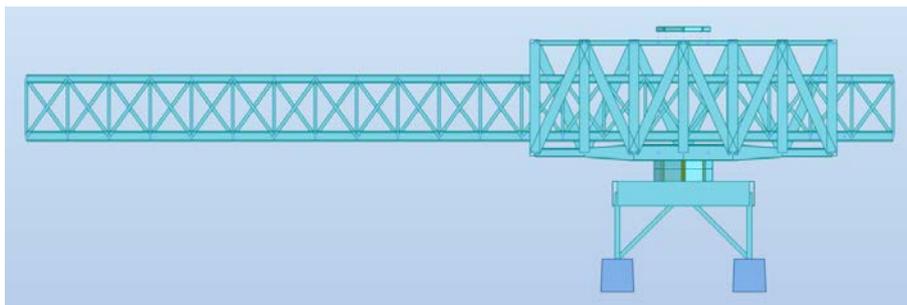


Figura 8.14 – Modelo del cargador (offsets representados)

8.6.1.- Cálculo estático

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis de tipo estático, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída) cuando esta se encuentra posicionada a 0 °, 45 ° y 90 °.

8.6.1.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis estático del cargador con la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

CARGADOR							
PLUMA EXTENDIDA 0							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,6	13,4		6	0,004	0,002	0,004
Nudo	222	222		243	49	702	277
Caso	18	304 (C)		20 (C)	302 (C)	16	18
MIN	-4	-11,8		-36,7	-0,008	-0,011	-0,004
Nudo	222	244		266	233	271	277
Caso	301 (C)	18		302 (C)	304 (C)	302 (C)	304 (C)
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	195,87	184,59	193,51	157,82	0	0	184,59
Barra	20	500	20	79	1	1	500
Nudo	27	214	27	3	1	1	214
Caso	302 (C)	21 (C)	302 (C)	304 (C)	104	104	21 (C)
MIN	-182,09	-194,27	0	0	-193,51	-157,82	-182,09
Barra	501	20	1	1	20	79	501
Nudo	258	27	1	1	27	3	258
Caso	302 (C)	302 (C)	104	104	302 (C)	304 (C)	302 (C)

PLUMA EXTENDIDA 45							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,7	13,6	6,3	0,004	0,002	0,004	
Nudo	222	222	243	49	56	277	
Caso	18	304 (C)	20 (C)	302 (C)	132 (C)	18	
MIN	-4,3	-12,2	-38,4	-0,007	-0,011	-0,004	
Nudo	222	244	266	233	271	277	
Caso	301 (C)	18	301 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	204,13	184,59	197,33	146,56	0	0	184,59
Barra	20	500	20	79	1	1	500
Nudo	27	214	27	3	1	1	214
Caso	301 (C)	21 (C)	301 (C)	304 (C)	104	104	21 (C)
MIN	-182,58	-197,76	0	0	-197,33	-146,56	-182,58
Barra	501	20	1	1	20	79	501
Nudo	258	27	1	1	27	3	258
Caso	302 (C)	302 (C)	104	104	301 (C)	304 (C)	302 (C)
PLUMA EXTENDIDA 90							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	0,6	12,5	6	0,004	0,002	0,004	
Nudo	222	222	243	49	702	277	
Caso	18	304 (C)	301 (C)	302 (C)	16	18	
MIN	-4,2	-11,8	-37,7	-0,006	-0,011	-0,004	
Nudo	222	244	266	233	271	277	
Caso	301 (C)	18	301 (C)	304 (C)	301 (C)	304 (C)	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	208,4	184,59	200,94	115,49	0	0	184,59
Barra	20	500	20	79	1	1	500
Nudo	27	214	27	3	1	1	214
Caso	301 (C)	21 (C)	301 (C)	304 (C)	104	104	21 (C)
MIN	-182,09	-196,76	0	0	-200,94	-115,49	-182,09
Barra	501	20	1	1	20	79	501
Nudo	258	27	1	1	27	3	258
Caso	302 (C)	301 (C)	104	104	301 (C)	304 (C)	302 (C)

Tabla 8.28 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en el cargador con la pluma extendida

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 208,4 MPa cuando la pluma se encuentra posicionada a 90 °, aproximadamente el valor de tensión máxima de 200 MPa impuesto para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales) y similar a los valores de tensión obtenidos durante el análisis individual de cada modelo.

Por otro lado, el máximo desplazamiento se produce en el sentido negativo del eje Z (cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °) y tiene un valor de 38,4 cm. Dicho desplazamiento contempla la deformación simultánea de la pluma, el cradle, la base y la torre, por lo que no se llevará a cabo la comprobación de flecha máxima habitual.

Finalmente, si se obtienen las reacciones máximas para las distintas situaciones estudiadas se tiene lo siguiente:

REACCIONES						
PLUMA EXTENDIDA 0						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	272,24	654,95	2504,79	51,84	17,83	1,58
Nudo	502	500	502	502	503	501
Caso	305 (C)	302 (C)	304 (C)	304 (C)	18	304 (C)
MIN	-570,51	-1009,4	-988,91	-25,22	-29,15	-1,39
Nudo	503	502	501	500	503	503
Caso	304 (C)	304 (C)	20 (C)	18	304 (C)	18
PLUMA EXTENDIDA 45						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	749,47	333,19	2702,18	40,64	23,01	1,52
Nudo	502	502	502	502	500	501
Caso	301 (C)	18	301 (C)	304 (C)	16	304 (C)
MIN	-569,43	-687,31	-1347,45	-30,89	-32,7	-1,09
Nudo	503	503	501	502	503	501
Caso	23 (C)	304 (C)	21 (C)	18	23 (C)	18

PLUMA EXTENDIDA 90						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	386,29	654,93	2504,51	47,89	21,56	1,56
Nudo	500	500	502	502	500	503
Caso	304 (C)	302 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)
MIN	-435,23	-998,85	-988,91	-25,22	-22,53	-1,39
Nudo	503	502	501	500	503	503
Caso	304 (C)	304 (C)	20 (C)	18	23 (C)	18

Tabla 8.29 - Valores máximos de las reacciones en el cargador con la pluma extendida

Tal y como se indica en la tabla superior, la reacción máxima tiene un valor de 2702,18 kN cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °, valor que será considerado posteriormente para dimensionar los anclajes de las cimentaciones.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones del cargador con la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

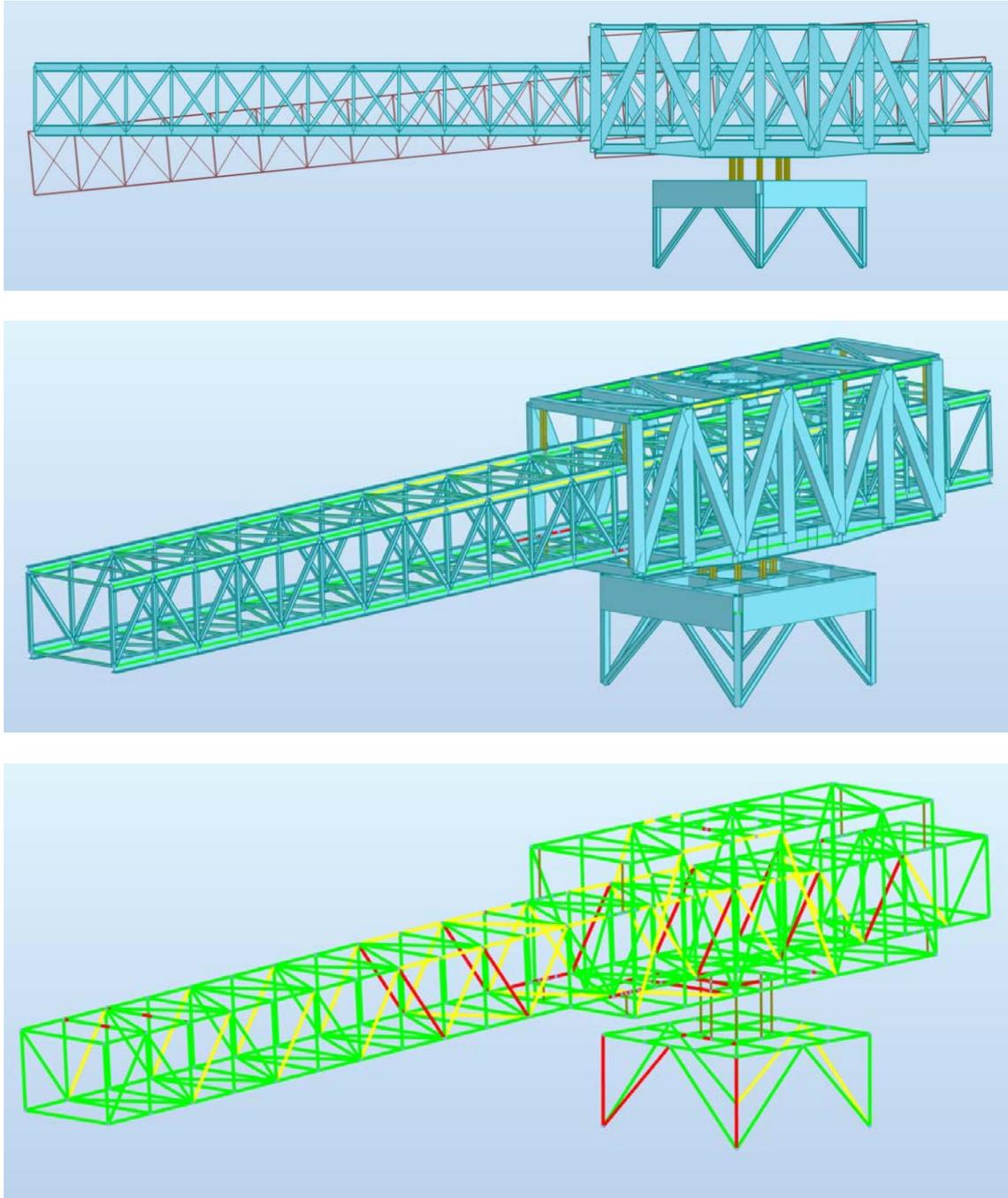


Figura 8.15 – Deformación y mapa de tensiones del cargador con la pluma extendida

Es importante tener en cuenta que el modelo del cargador posicionado a 90° fue obtenido a partir del modelo a 0° (los nudos inferiores de los pilares de la torre coinciden con los nudos del modelo a 0° , cuando deberían estar girados 90°), por lo que a la hora de interpretar las reacciones habrá que considerar las equivalencias recogidas en la siguiente tabla:

Nudo del modelo a 90°	Nudo para la comparación con el modelo a 0° y 45°
500	501
501	503
502	500
503	502

Tabla 8.30 – Equivalencia de los nudos inferiores de los pilares de la torre entre los modelos a 90° y otras posiciones

Si no se indica lo contrario, el razonamiento anterior se mantiene a lo largo de los apartados posteriores.

8.6.1.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis estático del cargador con la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores máximos de desplazamiento y tensión en cada caso:

CARGADOR							
PLUMA RETRAÍDA 0							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	3,2	11,4	4,6	0,004	0,007	0,004	
Nudo	243	243	200	51	280	210	
Caso	23 (C)	304 (C)	23 (C)	300 (C)	303 (C)	16	
MIN	-0,5	-10	-24,9	-0,007	-0,002	-0,004	
Nudo	264	265	265	230	703	210	
Caso	16	18	303 (C)	304 (C)	18	18	
PLUMA RETRAÍDA 45							
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	175,3	170,75	149,76	148,21	0	0	170,75
Barra	386	707	10	81	1	1	707
Nudo	301	503	14	7	1	1	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-131,21	-180,53	0	0	-149,76	-148,21	-131,21
Barra	484	386	1	1	10	81	484
Nudo	229	301	1	1	14	7	229
Caso	23 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	23 (C)
PLUMA RETRAÍDA 0							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	3,6	11,5	5,2	0,004	0,008	0,004	
Nudo	243	243	200	51	280	210	
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	300 (C)	304 (C)	16	
MIN	-0,6	-10,4	-26,8	-0,007	-0,002	-0,004	
Nudo	264	265	265	230	55	210	
Caso	16	18	304 (C)	304 (C)	132 (C)	18	

	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	172,84	150,49	151,15	136,95	0	0	150,49
Barra	714	707	714	81	1	1	707
Nudo	510	503	510	7	1	1	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-131,2	-175,66	0	0	-151,15	-136,95	-131,2
Barra	484	386	1	1	714	81	484
Nudo	229	301	1	1	510	7	229
Caso	23 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	23 (C)
PLUMA RETRAÍDA 90							
	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)	
MAX	3,6	10,5	5,1	0,004	0,008	0,004	
Nudo	243	243	200	51	280	210	
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	300 (C)	304 (C)	16	
MIN	-0,5	-10	-26,5	-0,006	-0,002	-0,004	
Nudo	264	265	265	233	703	210	
Caso	16	18	304 (C)	304 (C)	18	18	
	S max (MPa)	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
MAX	169,9	169,03	157,98	105,96	0	0	169,03
Barra	22	707	22	81	1	1	707
Nudo	28	503	28	7	1	1	503
Caso	304 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	104	104	304 (C)
MIN	-131,21	-167,28	0	0	-157,98	-105,96	-131,21
Barra	484	386	1	1	22	81	484
Nudo	229	301	1	1	28	7	229
Caso	23 (C)	301 (C)	104	104	304 (C)	304 (C)	23 (C)

Tabla 8.31 - Valores máximos de desplazamiento y tensión en el cargador con la pluma extendida

Como se puede observar, el máximo valor absoluto de la tensión es de 180,53 MPa cuando la pluma se encuentra posicionada a 0 °, valor inferior a la tensión máxima de 200 MPa impuesto para el caso de carga III (combinación de cargas principales, adicionales y especiales) y similar a los valores de tensión obtenidos durante el análisis individual de cada modelo.

Por otro lado, el máximo desplazamiento se produce en el sentido negativo del eje Z (cuando la pluma se encuentra posicionada a 45 °) y tiene un valor de 26,8 cm. Dicho desplazamiento contempla la deformación simultánea de la pluma, el cradle, la base y la torre, por lo que no se llevará a cabo la comprobación de flecha máxima habitual.

Finalmente, si se obtienen las reacciones máximas para las distintas situaciones estudiadas se tiene lo siguiente:

REACCIONES						
PLUMA RETRAÍDA 0						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	548,76	517,67	2351,28	48,52	27,21	1,28
Nudo	502	501	503	503	502	500
Caso	304 (C)	303 (C)	304 (C)	304 (C)	304 (C)	18
MIN	-272,52	-937,3	-788,36	-23,14	-16,43	-1,47
Nudo	503	503	500	501	502	500
Caso	303 (C)	304 (C)	23 (C)	18	18	304 (C)
PLUMA RETRAÍDA 45						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	510,59	317,48	2250,01	38,14	29,62	1
Nudo	503	500	501	501	503	502
Caso	23 (C)	300 (C)	304 (C)	304 (C)	23 (C)	18
MIN	-656,14	-671,39	-910,31	-28,39	-21,23	-1,43
Nudo	501	503	502	501	500	502
Caso	304 (C)	304 (C)	22 (C)	18	16	304 (C)
PLUMA RETRAÍDA 90						
	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
MAX	413,48	517,66	2350,99	44,58	20,64	1,28
Nudo	502	501	503	503	502	500
Caso	304 (C)	303 (C)	304 (C)	304 (C)	23 (C)	18
MIN	-376,72	-926,75	-788,36	-23,14	-20,94	-1,45
Nudo	501	503	500	501	501	502
Caso	304 (C)	304 (C)	23 (C)	18	304 (C)	304 (C)

Tabla 8.32 - Valores máximos de las reacciones en el cargador con la pluma extendida

Tal y como se indica en la tabla superior, la reacción máxima tiene un valor de 2351,28 kN cuando la pluma se encuentra posicionada a 0° , valor que será considerado posteriormente para dimensionar los anclajes de las cimentaciones.

La imagen inferior muestra la deformación de la estructura y el mapa de tensiones del cargador con la pluma extendida para las condiciones más desfavorables descritas anteriormente:

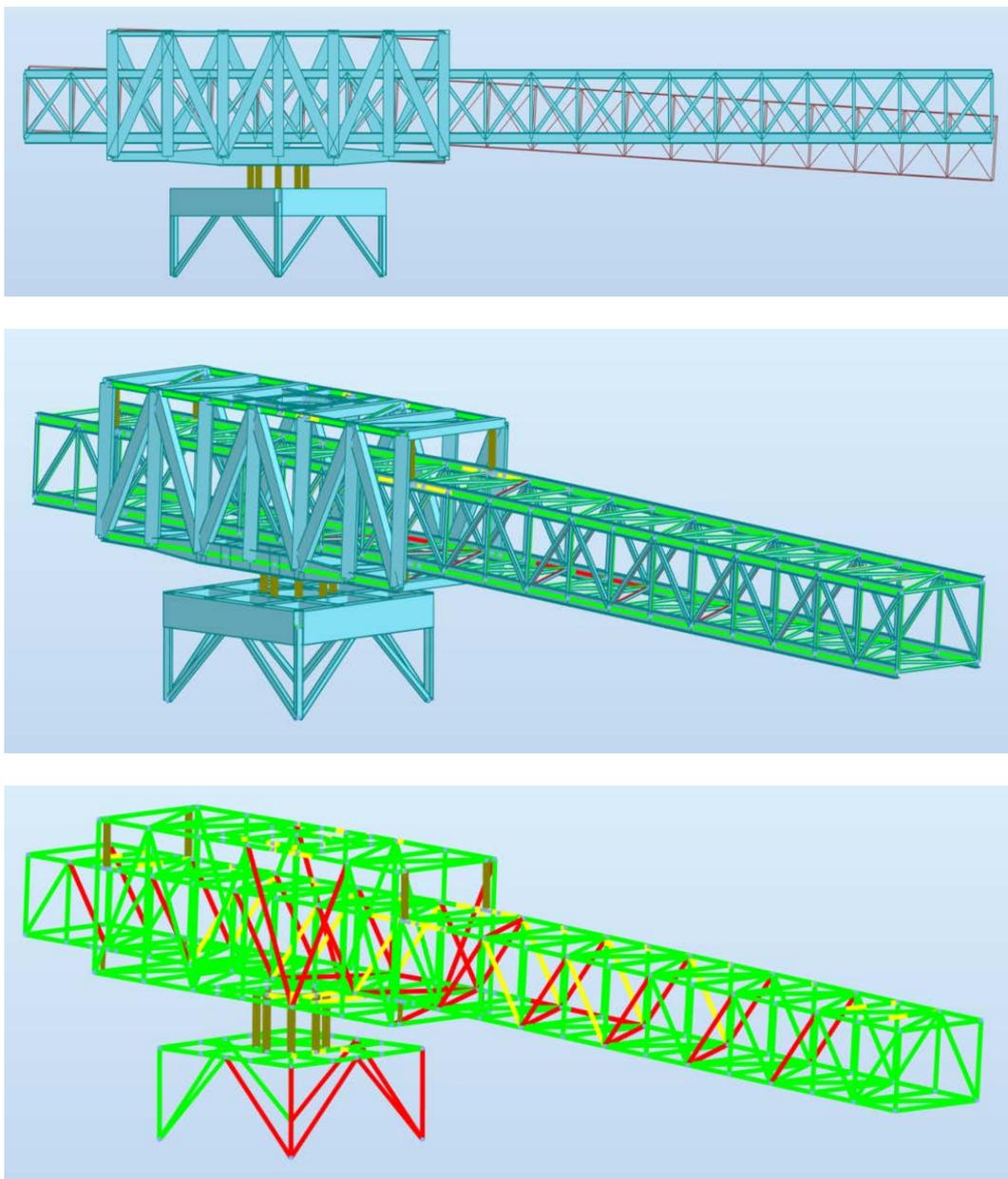


Figura 8.16 – Deformación y mapa de tensiones del cargador con la pluma retraída

8.6.2.- Cálculo a pandeo lineal

En segundo lugar, se llevará a cabo un análisis a pandeo lineal, contemplando las dos posiciones extremas de la pluma (extendida y retraída) cuando esta se encuentra posicionada a 45 °, posición en la que la mayor parte de los esfuerzos de compresión serán soportados por un solo pilar.

8.6.2.1.- Pluma extendida

Una vez realizado el análisis a pandeo del cargador con la pluma extendida, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
306/10	-6,39513e+01	8,63730e-03
306/7	-5,79596e+01	5,07696e-03
306/6	-5,68217e+01	4,17104e-03
303/10	-5,48840e+01	3,89021e-03
305/10	-5,44198e+01	9,34594e-03
306/4	-5,29610e+01	8,10004e-03
306/2	-5,07334e+01	1,19975e-02
303/7	-4,93472e+01	2,31501e-02
305/7	-4,89798e+01	1,22191e-02
303/6	-4,84736e+01	9,38978e-03
305/6	-4,80528e+01	1,45810e-02
304/9	-4,75732e+01	5,48622e-03
304/8	-4,65517e+01	9,54391e-03
303/4	-4,49307e+01	1,28823e-02
305/4	-4,45591e+01	6,73917e-03
306/1	-4,44799e+01	3,51096e-03
303/3	-4,33560e+01	1,58551e-02
305/3	-4,29223e+01	1,14093e-02
300/10	-4,15427e+01	9,09302e-03
302/10	-4,13986e+01	1,06311e-02
301/9	-4,07516e+01	1,90454e-02
304/5	-3,83172e+01	6,84914e-03
300/7	-3,75865e+01	1,94587e-02
303/1	-3,75193e+01	2,28793e-03
301/7	-3,75149e+01	1,02412e-02

302/7	-3,74895e+01	2,11743e-02
305/1	-3,72434e+01	5,51239e-03
300/6	-3,68664e+01	1,06479e-02
301/6	-3,68066e+01	1,62606e-02
302/6	-3,67359e+01	7,91633e-03
301/5	-3,55724e+01	4,29928e-03
300/4	-3,43629e+01	5,78026e-03
302/4	-3,42537e+01	2,57408e-03
304/2	-3,41201e+01	4,20094e-03
300/3	-3,29151e+01	1,11892e-02
302/2	-3,27906e+01	3,80210e-03
304/1	-3,24648e+01	1,06144e-03
301/2	-3,14704e+01	9,96329e-03
300/1	-2,88707e+01	4,89701e-03
302/1	-2,87897e+01	4,42001e-03
301/1	-2,81906e+01	7,42249e-03
301/3	3,18117e+01	4,54576e-03
300/2	3,27005e+01	4,35833e-03
302/3	3,28362e+01	4,81716e-03
301/4	3,44022e+01	5,02213e-03
300/5	3,64644e+01	1,17701e-02
302/5	3,66073e+01	7,62792e-03
304/3	3,73638e+01	3,77419e-03
304/4	3,83074e+01	1,39649e-03
300/8	3,92672e+01	9,05346e-03
302/8	3,94277e+01	1,12512e-02
304/6	3,95700e+01	2,35248e-03
301/8	3,99437e+01	6,72137e-04
300/9	4,06367e+01	6,85991e-03
302/9	4,08784e+01	6,51415e-03
301/10	4,12624e+01	1,10365e-02
303/2	4,19955e+01	3,75449e-03
305/2	4,24572e+01	7,05194e-03
304/7	4,50684e+01	6,40254e-03
303/5	4,72675e+01	4,18566e-03
305/5	4,77618e+01	1,47524e-02
304/10	4,91350e+01	5,55105e-03
306/3	5,07816e+01	5,95467e-03
303/8	5,08165e+01	1,35980e-03
305/8	5,13804e+01	5,86181e-03
303/9	5,22163e+01	1,15736e-02
305/9	5,30297e+01	8,07252e-03
306/5	5,66352e+01	1,20537e-02
306/8	6,06679e+01	3,93355e-03
306/9	6,30939e+01	4,95213e-03

Tabla 8.33 – Coeficientes de pandeo para el cargador con la pluma extendida

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 28,19 y 28,79. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en el cargador cuando la pluma se encuentra totalmente extendida.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

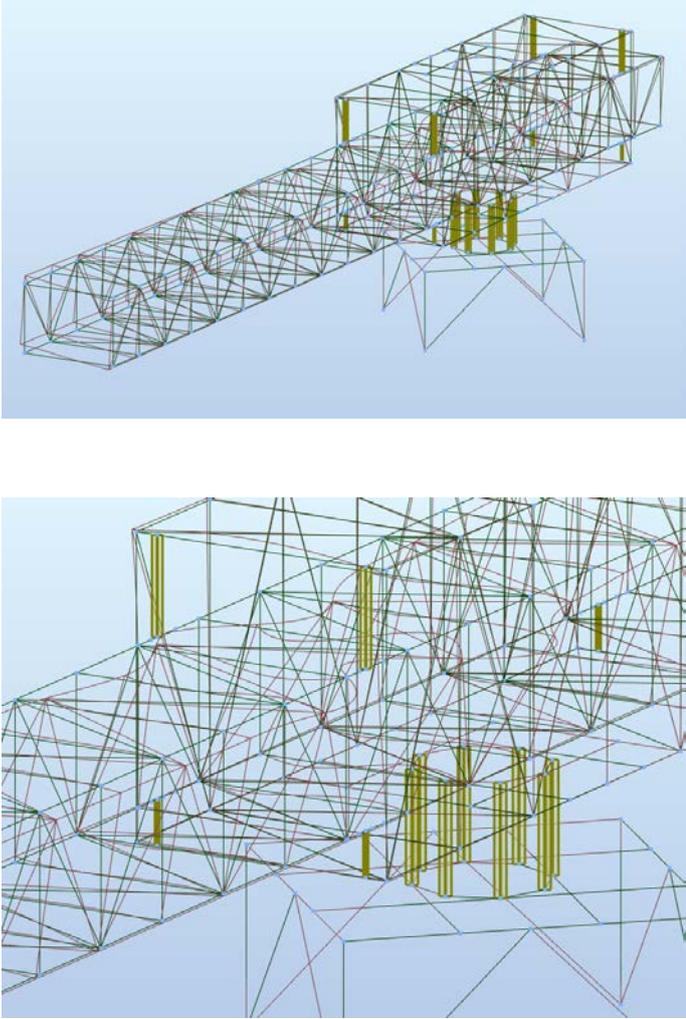
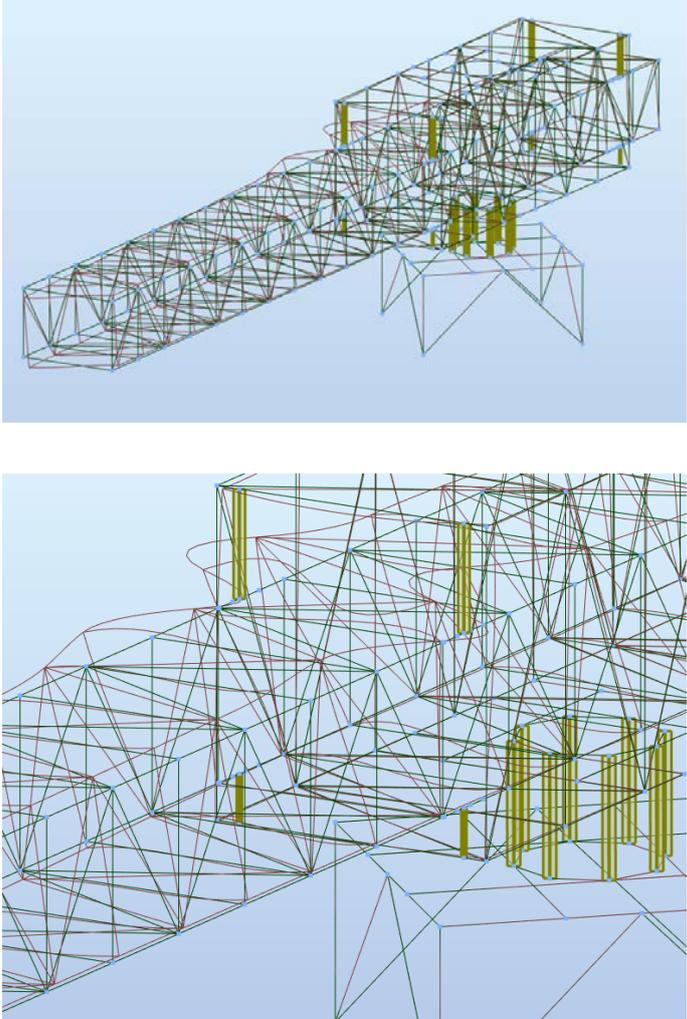
Caso 301 – Modo 1	Caso 302- Modo 1
	

Tabla 8.34 - Modos de pandeo del cargador con la pluma extendida

De acuerdo con las imágenes superiores, en caso de producirse el pandeo, se daría sobre la pluma, en las barras situadas en las inmediaciones de la zona de apoyo de esta sobre el cradle. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

8.6.2.2.- Pluma retraída

Una vez realizado el análisis a pandeo del cargador con la pluma retraída, los resultados obtenidos quedan recogidos en la siguiente tabla, donde se indican los valores del coeficiente de pandeo en cada caso:

Caso/Modo	Coef.crí.	Precisión
306/9	-9,45643e+01	1,00119e-02
306/8	-8,89937e+01	6,28163e-03
306/6	-8,63211e+01	1,02223e-02
306/3	-7,77572e+01	9,83071e-03
306/2	-7,52105e+01	1,36477e-03
306/1	-7,09440e+01	6,95341e-03
301/10	-6,22762e+01	2,86054e-02
304/10	-6,18416e+01	1,85072e-02
305/9	-5,92552e+01	7,92735e-03
304/8	-5,91030e+01	4,17056e-03
303/9	-5,87608e+01	7,86190e-03
302/9	-5,84985e+01	6,81832e-03
301/8	-5,82917e+01	1,34282e-02
300/9	-5,82694e+01	7,46619e-03
304/7	-5,75983e+01	1,73134e-02
301/7	-5,63388e+01	7,12837e-03
305/7	-5,56928e+01	4,69772e-03
303/7	-5,51901e+01	4,06033e-03
302/7	-5,51059e+01	7,83369e-03
300/7	-5,48666e+01	5,32053e-03
305/5	-5,38534e+01	1,18140e-02
302/5	-5,34768e+01	6,77540e-03
303/6	-5,32415e+01	1,06707e-02
300/6	-5,31815e+01	6,42528e-03
304/5	-5,31296e+01	1,15928e-02
301/5	-5,31078e+01	2,85242e-03
302/4	-4,99176e+01	3,45455e-03
300/4	-4,95450e+01	3,78514e-03

305/4	-4,93768e+01	4,79756e-04
305/3	-4,86998e+01	3,94524e-03
303/3	-4,86473e+01	5,57372e-04
303/2	-4,83224e+01	8,37226e-03
302/2	-4,81732e+01	6,53471e-03
300/2	-4,79952e+01	6,28157e-03
301/2	-4,68689e+01	5,57416e-03
304/3	-4,54515e+01	1,17852e-02
305/1	-4,42899e+01	5,62721e-03
302/1	-4,40058e+01	5,74335e-03
303/1	-4,38441e+01	5,04307e-03
300/1	-4,37900e+01	5,53054e-03
301/1	-4,33604e+01	6,02340e-03
304/2	-4,16373e+01	5,71520e-03
304/1	4,15236e+01	2,36747e-03
301/3	4,71245e+01	1,96166e-03
305/2	4,85580e+01	2,17168e-03
302/3	4,87555e+01	4,17859e-03
303/4	4,89139e+01	2,81135e-03
300/3	4,89219e+01	2,16168e-03
304/4	5,16264e+01	4,06306e-03
301/4	5,26926e+01	5,89343e-03
303/5	5,27986e+01	4,58308e-03
300/5	5,29646e+01	3,69737e-03
304/6	5,32818e+01	3,11101e-03
302/6	5,36138e+01	5,97743e-03
305/6	5,41353e+01	3,64385e-03
301/6	5,49074e+01	4,04569e-03
305/8	5,67573e+01	3,64376e-03
302/8	5,67747e+01	1,19769e-03
300/8	5,70642e+01	5,26160e-04
303/8	5,73858e+01	4,59612e-03
301/9	5,95216e+01	8,31461e-04
304/9	6,00766e+01	1,58784e-03
300/10	6,05377e+01	1,23681e-03
302/10	6,05910e+01	1,69025e-03
303/10	6,13226e+01	2,33386e-03
305/10	6,21248e+01	5,10581e-04
306/4	7,95894e+01	3,99740e-03
306/5	8,50509e+01	7,66921e-04
306/7	8,65978e+01	4,70442e-03
306/10	9,51955e+01	5,64572e-03

Tabla 8.35 – Coeficientes de pandeo para el cargador con la pluma retraída

Tal y como se puede observar, los mínimos valores en valor absoluto del coeficiente de pandeo resultan ser de 41,52 y 41,64. Dicho coeficiente tiene un valor superior a la unidad, por lo que no se producirá pandeo en el cargador cuando la pluma se encuentra totalmente retraída.

Si se representan gráficamente los dos modos de pandeo más desfavorables, el resultado es el mostrado en las imágenes siguientes:

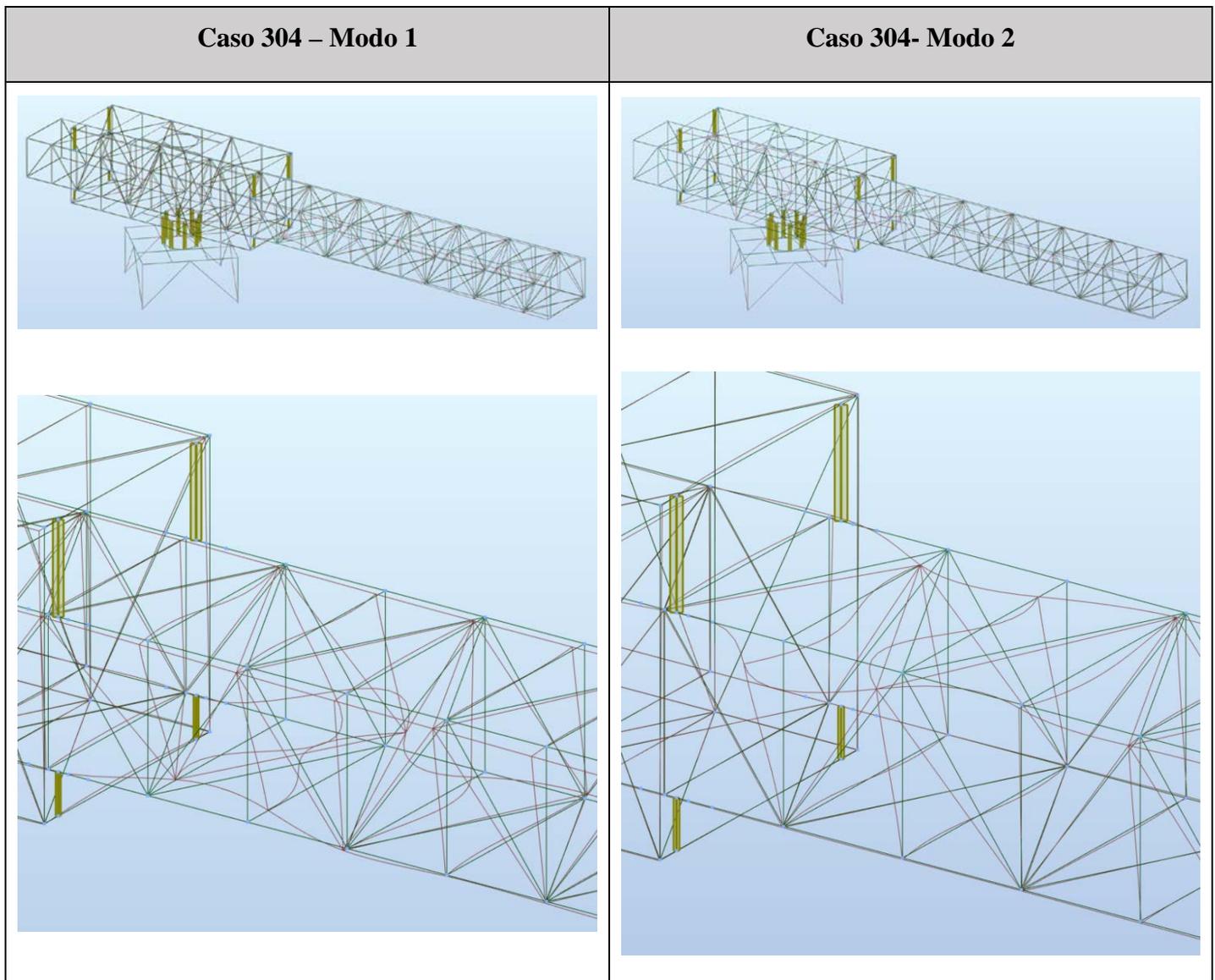


Tabla 8.36 - Modos de pandeo del cargador con la pluma retraída

De acuerdo con las imágenes superiores, en caso de producirse el pandeo, se daría sobre la pluma, en las barras situadas en las inmediaciones de la zona de apoyo de esta sobre el cradle. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

8.7.- CUADRO DE CARGAS

Con vistas a la fabricación de la cimentación de la torre, resulta interesante la elaboración de un cuadro de cargas en el que se indiquen las reacciones en cada apoyo debidas a los distintos tipos de esfuerzos que actúan sobre el cargador.

En este caso, se considerarán las reacciones debidas al peso propio, *live loads* y viento en servicio cuando el cargador se encuentra en la posición más desfavorable de 45° . En el caso del peso propio, se analizarán las reacciones producidas cuando la pluma se encuentre totalmente extendida o retraída. Por otro lado, se estudiarán las reacciones producidas por el viento fuera de servicio cuando el cargador se encuentra en la posición de parking a 90° .

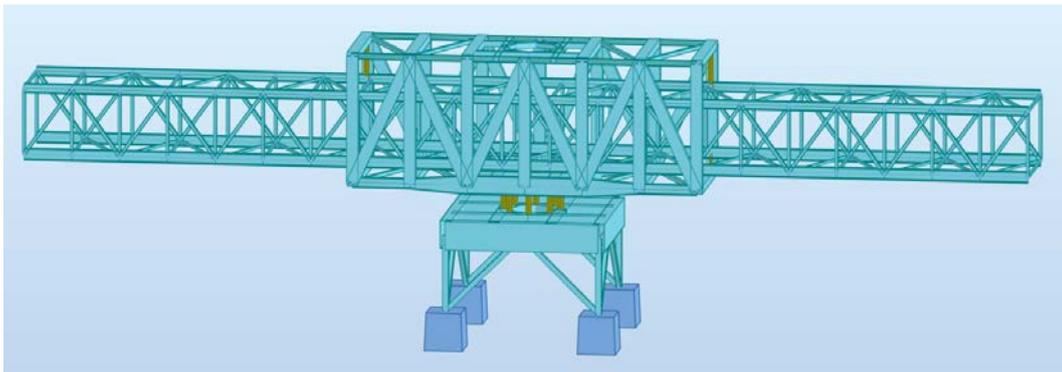


Figura 8.17 - Modelo del cargador en posición de parking

La imagen inferior muestra una representación esquemática de la disposición del cargador y las distintas posiciones consideradas para la elaboración del cuadro de cargas, así como la equivalencia entre la denominación de los nudos en Robot y en dicho cuadro:

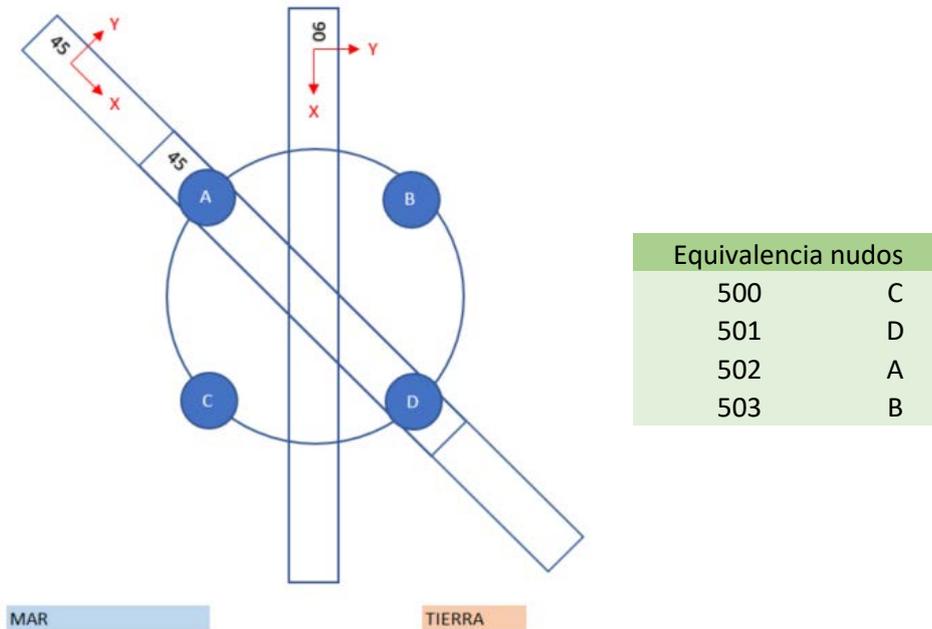


Figura 8.18 -Posiciones del cargador consideradas para la elaboración del cuadro de cargas

Por un lado, tal y como se puede observar en la imagen superior, el eje X representa la dirección longitudinal de la pluma y el eje Y la dirección transversal. De esta forma, el eje Z representará la dirección vertical en sentido ascendente, por lo que una reacción (sentido opuesto al eje) positiva implicará compresión, mientras que una reacción negativa implicará tracción.

Por otro lado, el presente apartado ya incluye la corrección de la numeración de los nudos inferiores de los pilares de la torre descrita en el apartado 8.6.1.1.-.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos durante la elaboración del cuadro de cargas. Los pilares de la torre estarán unidos a tierra firme a través de los anclajes, por lo que las reacciones se producirán únicamente en la dirección vertical y horizontal (donde el eje X representa la dirección longitudinal de la pluma y el eje Y la dirección transversal), mientras que los momentos son despreciables a pesar de modelar los apoyos como un empotramiento (es habitual modelar los apoyos de este tipo como rótulas, ya que los anclajes trabajarán a tracción-compresión sin transmitir momentos).

CUADRO DE CARGAS (ton)													
TIPO DE ESFUERZO	POSICIÓN	C			D			A			B		
		V	Hx	Hy	V	Hx	Hy	V	Hx	Hy	V	Hx	Hy
PESO PROPIO	PLUMA EXTENDIDA 45°	69	-20	24	-17	-4	0	158	45	0	73	-20	-24
PESO PROPIO	PLUMA RETRAÍDA 45°	69	16	24	138	-40	0	3	9	0	73	16	-24
LIVE LOADS	PLUMA EXTENDIDA 45°	24	-18	8	-52	9	0	100	26	0	24	-18	-8
VIENTO (126 km/h)	PLUMA EXTENDIDA 45°	-32	13	-15	0	0	7	0	0	-20	32	-13	-14
VIENTO FUERA SERVICIO (180 km/h)	PLUMA CENTRADA 90°	-45	9	-21	45	-9	-20	-45	-9	-21	45	9	-20

Tabla 8.37 – Cuadro de cargas del cargador

Como se puede observar, la reacción resultante es de 283 toneladas en la dirección vertical para el peso propio, de 96 toneladas en la dirección vertical para las *live loads*, de 42 toneladas en la dirección horizontal para el viento en servicio y de 82 toneladas en la dirección horizontal para el viento fuera de servicio.

9. Cálculo y selección de los accionamientos

El presente capítulo recoge el cálculo y la selección de los distintos accionamientos necesarios para que el cargador pueda efectuar los movimientos requeridos durante su operación.

9.1.- CÁLCULO DEL MECANISMO DE TRASLACIÓN

Como ya se comentó anteriormente, el mecanismo de traslación de la pluma consiste en un mecanismo piñón-cremallera con transmisión por cadena. Se empleará un total de dos piñones accionados mediante dos motorreductores helicoidales cónicos para optimizar el tamaño de la parte superior del cradle (ver figura inferior), siendo necesario únicamente uno de ellos para lograr el movimiento de traslación de la pluma.

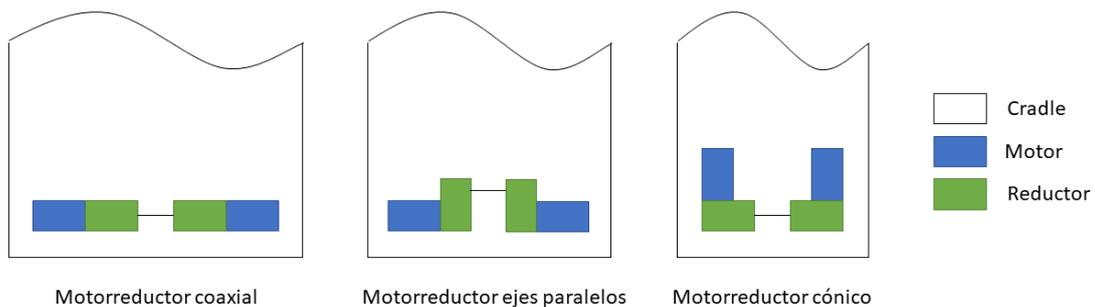


Figura 9.1 - Disposición de los motorreductores en la parte superior del cradle

Además, los ejes de salida de ambos accionamientos estarán acoplados para compensar las tensiones experimentadas por las dos cadenas dispuestas sobre la pluma.



Figura 9.2 - Accionamientos de traslación acoplados mediante un eje común

9.1.1.- Cargador en servicio

La potencia necesaria para gobernar el movimiento de traslación de la pluma cuando el cargador se encuentra en servicio será calculada considerando una velocidad de viento de 35 m/s y una velocidad de traslación de 12 m/min.

Por un lado, se considerará una masa total a desplazar de 118897,47 kg, una fuerza de viento frontal de 2143,31 y una reacción total en las ruedas de apoyo de 244211,54 kg (calculada a partir de los esfuerzos producidos en el cradle por las cargas que actúan sobre la pluma), lo cual se opone al movimiento de traslación de la pluma.

Por otro lado, se considerará un coeficiente de fricción por rodadura de 0,01 (FEM [17]), un factor de servicio de 1,15 (especificaciones) y una eficiencia del sistema de 0,80 (de esta forma se trabaja del lado de la seguridad, ya que la eficiencia de los motorreductores seleccionados es superior al 90 %).

Se tendrá en cuenta la resistencia debida al rozamiento por rodadura de las ruedas de apoyo, la resistencia debida a la inercia del propio cargador y la resistencia debida al viento frontal sobre la pluma. Dichas resistencias pueden ser calculadas como se indica a continuación:

$$P_{rozamiento}(W) = \left(R_{V_{delanteras}}(N) + R_{V_{traseras}}(N) + R_{H_{viento}}(N) \right) \cdot v \left(\frac{m}{s} \right) \cdot f \quad (9.1)$$

$$P_{inercia}(W) = m_{desplazada}(kg) \cdot a \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot v \left(\frac{m}{s} \right) \quad (9.2)$$

$$P_{viento}(W) = F_{viento}(N) \cdot v \left(\frac{m}{s} \right) \quad (9.3)$$

Las reacciones verticales tienen en cuenta el peso propio de la pluma, la cinta transportadora y la tolva telescópica, el peso del producto de la cinta transportadora y de la tolva telescópica, la acumulación de suciedad y de nieve sobre la pluma, la sobrecarga de la pluma y la carga de bloqueo de la tolva telescópica. La reacción horizontal se calcula a partir del viento incidiendo lateralmente sobre la pluma.

Finalmente, la tabla inferior recoge todos los datos comentados anteriormente, así como el valor de la potencia necesaria para vencer las resistencias al movimiento de traslación de la pluma:

POTENCIA ACCIONAMIENTOS	
Traslación en servicio	
Pluma	52598,69 kg
Cinta transportadora (+ accionamientos y pasarelas)	11700 kg
Tolva telescópica (+ accionamientos)	2800 kg
Cadena traslación	1575 kg
Producto cinta	2957,21 kg
Producto tolva + Bloqueo tolva	8424,62 kg
Acumulación suciedad pluma	716,95 kg
Nieve pluma	13125 kg
Sobrecarga pluma	25000 kg
	118897,47 kg
Viento pluma 1	2143,31 kg
Reacción vertical ruedas delanteras	163823,40 kg
Reacción vertical ruedas traseras	46500,93 kg
Reacción horizontal ruedas delanteras y traseras	33887,21 kg
	244211,54 kg
Velocidad	12 m/min
Tiempo aceleración	6 s
Aceleración	0,0333 m/s ²
Fricción	0,01
Factor servicio	1,15
Eficiencia	0,80
Rozamiento	4791,43 W
Inercia	792,65 W
Viento	4205,18 W
Potencia	14,07 kW
Potencia / motor	14,07 kW
Potencia seleccionada	2x15 kW

Tabla 9.1 - Cálculo de la potencia de los accionamientos de traslación del cargador en servicio

Como se puede observar, es necesario seleccionar dos motorreductores de al menos 14,07 kW cada uno. Una opción válida sería la selección de dos motorreductores IE3 NORD [16] de 15 kW de potencia, cuyas características se muestran en la siguiente imagen:

HELICAL BEVEL GEARS BLOCK SK 9042.1-160LP/4

IE3 / Premium Efficiency



Motor Power	15 kW	Ratio	27.91
Output Speed	52 1/min	Output Torque	2731 Nm
Service Factor	1	Overhung load	11 kN
Weight	227 kg	Axial Load	27.8 kN

Figura 9.3 - Motorreductores NORD seleccionados

Como se puede observar, el motorreductor de la imagen superior tiene un factor de servicio de valor unitario. Sin embargo, el factor de servicio de 1,15 ya se tuvo en cuenta en los cálculos previos a la selección. La velocidad de salida, la relación de reducción y el número de polos son coherentes con las necesidades del sistema.

El accionamiento seleccionado se trata de una primera aproximación. En la práctica, resulta habitual seleccionar individualmente el motor, el reductor y el acoplamiento.

9.1.2.- Cargador fuera de servicio

La potencia necesaria para gobernar el movimiento de traslación de la pluma cuando el cargador se encuentra fuera de servicio será calculada considerando una velocidad de viento de 50 m/s y una velocidad de traslación de 4 m/min.

POTENCIA ACCIONAMIENTOS	
Traslación fuera de servicio	
Pluma	52598,69 kg
Cinta transportadora (+ accionamientos y pasarelas)	11700 kg
Tolva telescópica (+ accionamientos)	2800 kg
Cadena traslación	1575 kg
Producto cinta	- kg
Producto tolva + Bloqueo tolva	- kg
Acumulación suciedad pluma	716,95 kg
Nieve pluma	13125 kg
Sobrecarga pluma	25000 kg
	107515,64 kg
Viento fuera servicio pluma 1	4374,11 N
Reacción vertical ruedas delanteras	134884,62 kg
Reacción vertical ruedas traseras	28943,99 kg
Reacción horizontal ruedas delanteras y traseras	69157,56 kg
	232986,18 kg
Velocidad	4 m/min
Tiempo aceleración	6 s
Aceleración	0,0111 m/s ²
Fricción	0,01
Factor servicio	1,15
Eficiencia	0,80
Rozamiento	1523,73 W
Inercia	79,64 W
Viento	2860,67 W
Potencia	6,42 kW
Potencia / motor	6,42 kW
Potencia seleccionada	2x15 kW

Tabla 9.2 – Cálculo de la potencia de los accionamientos de traslación del cargador fuera de servicio

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior, se puede comprobar como el movimiento de traslación del cargador fuera de servicio sería posible con dos motorreductores de 15 kW cada uno.

9.2.- CÁLCULO DEL MECANISMO DE GIRO

Como ya se indicó anteriormente, el mecanismo de giro consiste en un engranaje planetario que gira sobre un rodamiento axial. El engranaje planetario será accionado mediante tres motores trabajando como piñones, siendo necesarios únicamente dos de ellos para lograr el movimiento de giro del cargador.



Figura 9.4 – Mecanismo de giro situado entre los anillos de la base y del cradle

9.2.1.- Cargador en servicio

La potencia necesaria para gobernar el movimiento de giro del cargador cuando este se encuentra en servicio será calculada considerando una velocidad de viento de 35 m/s y una velocidad de traslación de 12 m/min en punta para un alcance de 40 m, lo cual equivale a una velocidad angular de 0,005 rad/s.

Por un lado, se considerará una masa total a desplazar de 314608,26 kg y una fuerza de viento lateral sobre la pluma de 22504,79 kg, lo cual se opone al movimiento de giro del cargador.

Por otro lado, se considerará un coeficiente de fricción por rodadura de 0,01 (FEM [17]), un factor de servicio de 1,15 (especificaciones) y una eficiencia del sistema de 0,80 (de esta forma se trabaja del lado de la seguridad, ya que la eficiencia de los motores seleccionados es superior al 90 %).

Se tendrá en cuenta la resistencia debida al rozamiento en el rodamiento axial, la resistencia debida a la inercia del propio cargador y la resistencia debida al viento lateral sobre la pluma. Dichas resistencias pueden ser calculadas como se indica a continuación:

$$P_{rozamiento}(W) = m_{desplazada}(N) \cdot w \left(\frac{rad}{s} \right) \cdot r(m) \cdot f \quad (9.4)$$

$$P_{inercia}(W) = \left[\sum I(kg \ m^2) + \sum (m_{desplazada}(kg) \cdot d^2(m^2)) \right] \cdot \alpha \left(\frac{rad}{s^2} \right) \cdot w \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (9.5)$$

$$P_{viento}(W) = F_{viento}(N) \cdot d_{equivalente}(m) \cdot w \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (9.6)$$

La inercia de cada cuerpo será calculada a partir del momento de inercia respecto al eje que pasa por su centro de masa y la distancia comprendida entre dicha masa y el eje de giro del cargador (Teorema de Steiner). En el caso de la inercia de cada componente respecto al eje que pasa por su centro de masa, la inercia del cargador puede ser calculada a partir de la inercia del cradle (obtenida a partir del modelo generado en Robot), de la pluma (obtenida también a partir del modelo generado en Robot) y del rodamiento (obtenida a partir de un modelo aproximado generado en SolidWorks), siendo el resto de las inercias despreciables respecto a las primeras.

Finalmente, la tabla inferior recoge todos los datos comentados anteriormente, así como el valor de la potencia necesaria para vencer las resistencias al movimiento de giro del cargador:

POTENCIA ACCIONAMIENTOS			
Giro en servicio			
Pluma	52598,69 kg	13,55 m	9660101,12 kg m2
Cinta transportadora (+ accionamientos y pasarelas)	11700 kg	13,55 m	2148783,44 kg m2
Tolva telescópica (+ accionamientos)	2800 kg	38,55 m	4161518,77 kg m2
Cadena traslación	1575 kg	13,55 m	289259,31 kg m2
Cradle	72801,76 kg	0 m	0 kg m2
Pasarelas cradle	1440 kg	0 m	0 kg m2
Ruedas apoyo (+ bogies)	25000 kg	0 m	0 kg m2
Cabina operario	2000 kg	7,5 m	112500 kg m2
Cabina control	5000 kg	0 m	0 kg m2
Contrapeso	0 kg	-7,5 m	0 kg m2
Cinta alimentación (+ galería)	30000 kg	0 m	0 kg m2
Accionamiento traslación	3000 kg	4,5 m	60750 kg m2
Accionamiento rotación (+ engranaje, corona y anillo)	27000 kg	0 m	0 kg m2
Producto cinta	2957,21 kg	31,68 m	2967358,16 kg m2
Producto tolva + Bloqueo tolva	8424,62 kg	38,55 m	12521148,70 kg m2
Producto cinta alimentación	15000 kg	0 m	0 kg m2
Acumulación suciedad pluma	716,95 kg	13,55 m	131673,01 kg m2
Acumulación suciedad cradle	69,04 kg	0 m	0 kg m2
Nieve pluma	13125 kg	13,55 m	2410494,24 kg m2
Nieve cradle	5400 kg	0 m	0 kg m2
Sobrecarga pluma	25000 kg	12,30 m	3783480,10 kg m2
Sobrecarga cradle	9000 kg	0 m	0 kg m2
	314608,26 kg		38247066,90 kg m2

Viento pluma 2	
F	22504,79 kg
d	13,55 m
Inercia pluma	12507943,61 kg m ²
Inercia cradle	2171424,96 kg m ²
Inercia rodamiento	103212,63 kg m ²
Velocidad punta	12 m/min
Outreach	40 m
Velocidad angular	0,005 rd/s
Tiempo aceleración	6 s
Aceleración angular	0,0008 rd/s ²
Fricción	0,01
Factor servicio	1,15
Eficiencia	0,80
Rozamiento	231,47 W
Inercia	220,96 W
Viento	14959,51 W
Potencia	22,15 kW
Potencia / motor	11,08 kW
Potencia seleccionada	3x11 kW

Tabla 9.3 - Cálculo de la potencia de los accionamientos de traslación del cargador en servicio

Como se puede observar, es necesario seleccionar tres motores de al menos 11,08 kW cada uno. Una opción válida sería la selección de tres motores IE3 WEG [22] de 11 kW de potencia, cuyas características se muestran en la siguiente imagen:



W22 - Cast Iron Frame - Premium Efficiency - IE3

Standard	Frequency	Voltage	Poles	Output	Weight	Noise level	Service Factor	Full load speed	Efficiency (%)			Duty	Ambient temperature	Degree of Protection
				kW					50%	75%	100%			
IEC	50 Hz	230/400V	4	11.00	113 kg	61 dB(A)	1.00	1470 rpm	91.1	91.8	91.6	S1	-20°C - +40°C	IP55

Figura 9.5 - Motores WEG seleccionados

Como se puede observar, el motorreductor de la imagen superior tiene un factor de servicio de valor unitario. Sin embargo, el factor de servicio de 1,15 ya se tuvo en cuenta en los cálculos previos a la selección. La velocidad de salida y el número de polos son coherentes con las necesidades del sistema. En este caso es el engranaje planetario el que actúa como reductor, lográndose relaciones de reducción muy superiores a las empleadas hasta el momento.

9.2.2.- Cargador fuera de servicio

La potencia necesaria para gobernar el movimiento de giro del cargador cuando este se encuentra fuera de servicio será calculada considerando una velocidad de viento de 50 m/s y una velocidad de traslación de 4 m/min en punta para un alcance de 40 m, lo cual equivale a una velocidad angular de 0,002 rad/s.

POTENCIA ACCIONAMIENTOS				
Giro fuera de servicio				
Pluma	52598,69 kg	13,55 m	9660101,12 kg m2	
Cinta transportadora (+ accionamientos y pasarelas)	11700 kg	13,55 m	2148783,44 kg m2	
Tolva telescópica (+ accionamientos)	2800 kg	38,55 m	4161518,77 kg m2	
Cadena traslación	1575 kg	13,55 m	289259,31 kg m2	
Cradle	72801,76 kg	0 m	0 kg m2	
Pasarelas cradle	1440 kg	0 m	0 kg m2	
Ruedas apoyo (+ bogies)	25000 kg	0 m	0 kg m2	
Cabina operario	2000 kg	7,5 m	112500 kg m2	
Cabina control	5000 kg	0 m	0 kg m2	
Contrapeso	0 kg	-7,5 m	0 kg m2	
Cinta alimentación (+ galería)	30000 kg	0 m	0 kg m2	
Accionamiento traslación	3000 kg	4,5 m	60750 kg m2	
Accionamiento rotación (+ engranaje, corona y anillo)	27000 kg	0 m	0 kg m2	
Producto cinta	- kg	31,68 m	- kg m2	
Producto tolva + Bloqueo tolva	- kg	38,55 m	- kg m2	
Producto cinta alimentación	- kg	0 m	- kg m2	
Acumulación suciedad pluma	716,95 kg	13,55 m	131673,01 kg m2	
Acumulación suciedad cradle	69,04 kg	0 m	0 kg m2	
Nieve pluma	13125 kg	13,55 m	2410494,24 kg m2	
Nieve cradle	5400 kg	0 m	0 kg m2	
Sobrecarga pluma	25000 kg	12,3 m	3783480,10 kg m2	
Sobrecarga cradle	9000 kg	0 m	0 kg m2	
	288226,43 kg		22758559,99 kg m2	

Viento fuera servicio pluma 2	
F	45928,13 kg
d	13,55 m
Inercia pluma	12507943,61 kg m ²
Inercia cradle	2171424,96 kg m ²
Inercia rodamiento	103212,63 kg m ²
Velocidad punta	4 m/min
Outreach	40 m
Velocidad angular	0,0017 rd/s
Tiempo aceleración	6 s
Aceleración angular	0,0003 rd/s ²
Fricción	0,01
Factor servicio	1,15
Eficiencia	0,80
Rozamiento	70,69 W
Inercia	17,38 W
Viento	10176,54 W
Potencia	14,76 kW
Potencia / motor	7,38 kW
Potencia seleccionada	3x11 kW

Tabla 9.4 – Cálculo de la potencia de los accionamientos de giro del cargador fuera de servicio

Siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior, se puede comprobar como el movimiento de giro del cargador fuera de servicio sería posible con tres motores de 11 kW cada uno.

10. Cálculo y selección de los anclajes de la torre

El presente capítulo recoge el cálculo del centro de gravedad del cargador y el posterior cálculo de los anclajes necesarios para evitar el vuelco de la estructura.

10.1.- CÁLCULO DE LA CARGA RESULTANTE Y SU UBICACIÓN

A partir de la tabla de cargas definida en el apartado 7.4.-, es posible calcular el sumatorio de cargas verticales, así como el sumatorio de momentos que actúan sobre el cargador. A los valores procedentes de dicha tabla se le añadirá el valor de la carga de bloqueo de la tolva telescópica y las cargas de viento o las cargas de viento fuera de servicio. De esta forma, es posible obtener una única carga resultante de valor igual al sumatorio de cargas verticales, que aplicada a una determinada distancia da lugar a un momento de valor igual al sumatorio de momentos.

Carga resultante	
Pluma extendida en servicio	
Σ Cargas verticales	387265,06 kg
Σ Momentos	2640774,78 kg·m
Distancia carga resultante	6,82 m
Pluma extendida fuera de servicio	
Σ Cargas verticales	360883,23 kg
Σ Momentos	2948815,02 kg·m
Distancia carga resultante	8,17 m

Tabla 10.1 – Cálculo de la carga resultante y su ubicación

Como se puede observar, el caso más desfavorable se da cuando la pluma se encuentra totalmente extendida y fuera de servicio, situación en la que la carga resultante se encuentra a 8,17 m respecto al eje de giro del cargador.

En vista de la ubicación de la carga resultante, no será necesario emplear un contrapeso y llevar a cabo un cálculo de estabilidad, sino que será suficiente el cálculo de los anclajes de la torre necesarios para soportar a tracción el vuelco del cargador.

10.2.- CÁLCULO DE LOS ANCLAJES DE LA TORRE

A partir de las reacciones máximas obtenidas en Robot para cada caso de carga y el número de anclajes empleados por cada pilar de la torre, es posible calcular la tensión soportada por cada uno.

Se seleccionará uno de los anclajes de barra DYWIDAG [23] cuyos datos técnicos se incluyen en la siguiente imagen:

Anclajes de barra DYWIDAG

Datos técnicos

Aceros de tesado DYWIDAG Y1050H

Diámetro nominal \varnothing [mm]	Resistencia a tracción $f_{p0.1k}/f_{pk}$ [N/mm ²]	Sección A [mm ²]	Carga al límite elástico $F_{p0.1k}$ [kN]	Carga al límite de rotura F_{pk} [kN]	Peso [kg/m]	Peso de la doble protección contra la corrosión [kg/m]	Homologación
26.5	950/1,050	552	525	580	4.48	7.4	○ ×
32	950/1,050	804	760	845	6.53	9.8	○ ×
36	950/1,050	1,018	960	1,070	8.27	12.3	○ ×
40	950/1,050	1,257	1,190	1,320	10.21	14.0	○ ×
47	950/1,050	1,735	1,650	1,820	14.10	20.0	○ ×

Tabla 10.2 - Anclajes de barra DYWIDAG considerados

La tabla inferior recoge los cálculos realizados para obtener la tensión máxima, así como el coeficiente de seguridad para cada caso de carga:

ANCLAJES TORRE	
Caso I	
Reacción máxima	1833,85 kN
Número de anclajes por pilar	4
Reacción máxima por anclaje	458,46 kN
Área por anclaje	1018 mm ²
Tensión por anclaje	450,36 MPa
Límite elástico	950 MPa
Coeficiente de seguridad	2,11
Caso II	
Reacción máxima	2550,97 kN
Número de anclajes por pilar	4
Reacción máxima por anclaje	637,74 kN
Área por anclaje	1018 mm ²
Tensión por anclaje	626,47 MPa
Límite elástico	950 MPa
Coeficiente de seguridad	1,52
Caso III	
Reacción máxima	2702,18 kN
Número de anclajes por pilar	4
Reacción máxima por anclaje	675,55 kN
Área por anclaje	1018 mm ²
Tensión por anclaje	663,60 MPa
Límite elástico	950 MPa
Coeficiente de seguridad	1,43

Tabla 10.3 – Tensiones máximas soportadas por los anclajes de la torre

Tal y como se puede observar en la tabla superior, empleando un total de cuatro anclajes por pilar de 36 mm de diámetro se obtiene lo siguiente:

- Un coeficiente de seguridad de 2,11 para el caso de carga I, superior al coeficiente de 1,50 impuesto por la FEM [17]
- Un coeficiente de seguridad de 1,52 para el caso de carga II, superior al coeficiente de 1,33 impuesto por la FEM [17]
- Un coeficiente de seguridad de 1,43 para el caso de carga III, superior al coeficiente de 1,20 impuesto por la FEM [17]

Los valores de las reacciones máximas considerados se tratan de valores de compresión, mientras que los anclajes trabajarán únicamente a tracción y, por tanto, los esfuerzos a soportar serán menores. De esta forma, se está trabajando del lado de la seguridad y se pueden dar por válidos los anclajes seleccionados.

11. Modelado tridimensional en SolidWorks

Una vez realizado el predimensionamiento del cargador a través de un modelo alámbrico, se llevará a cabo un análisis del mismo mediante el método de los elementos finitos.

Para ello, en primer lugar, se generará un modelo tridimensional en SolidWorks 2016 que se ajuste en el mayor grado posible a la configuración real del cargador y permita su posterior procesamiento en un software de elementos finitos, lo cual queda recogido en el presente capítulo.

11.1.- MODELADO DE LA PLUMA

Por un lado, el presente apartado incluye una descripción del diseño definitivo de la pluma, así como el proceso seguido para la generación del archivo CAD del mismo.

11.1.1.- Diseño definitivo

El diseño definitivo de la pluma se obtuvo a partir del modelo alámbrico definido en capítulos anteriores. El único cambio introducido en el mismo se trata del ajuste de las dimensiones y tipología de los perfiles cuadrados de las vigas transversales y pilares para dotar al modelo de continuidad desde un punto de vista constructivo, de forma similar a lo realizado en el apartado 8.4.-.

Para una información más detallada, consultar el documento *Planos* (el diseño definitivo del cargador no se definirá hasta finalizar el análisis mediante el método de los elementos finitos descrito en el próximo capítulo).

11.1.2.- Generación del modelo CAD

El modelo tridimensional CAD del diseño definitivo de la pluma será generado como un croquis tridimensional consistente únicamente en entidades lineales. La imagen inferior muestra el modelo en cuestión:

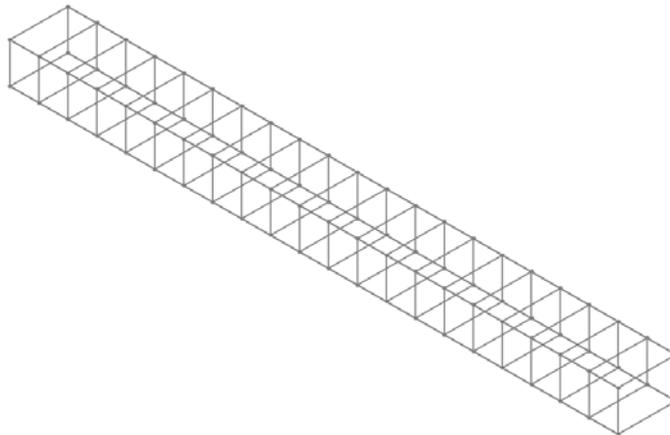


Figura 11.1 - Modelo tridimensional CAD de la pluma

El modelo será exportado en formato IGES, formato neutro que permitirá su lectura por parte de otro software. Posteriormente, se introducirá el archivo IGES en ANSYS, donde se definirá el arriostramiento de la pluma y se asignará una sección a cada línea, entre otras propiedades.

11.2.- MODELADO DEL CRADLE

Por otro lado, el presente apartado incluye una descripción del diseño definitivo del cradle, así como el proceso seguido para la generación del archivo CAD del mismo.

11.2.1.- Diseño definitivo

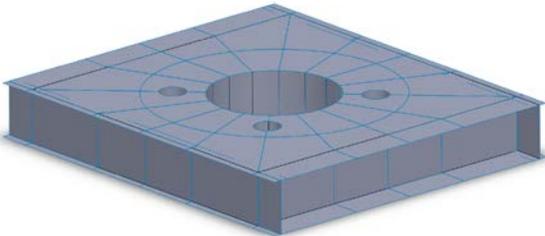
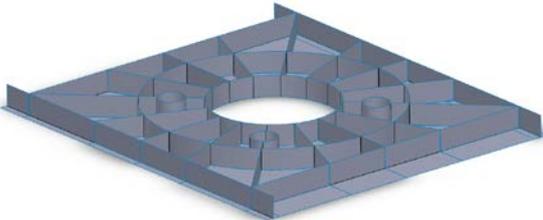
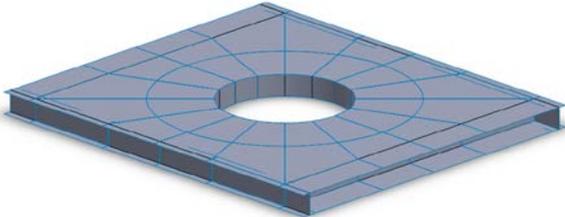
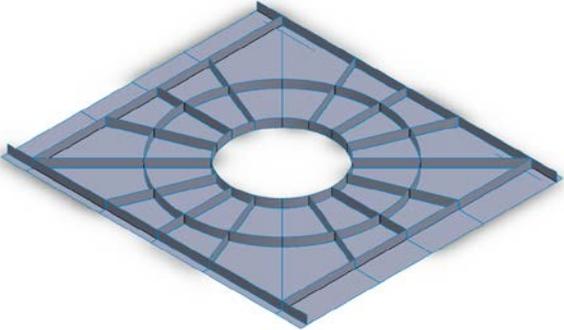
El diseño definitivo del cradle se obtuvo a partir del modelo alámbrico definido en capítulos anteriores. Los principales cambios introducidos en el mismo son descritos a continuación:

- Se ajustaron las dimensiones de los distintos perfiles empleados para dotar al modelo de continuidad desde un punto de vista constructivo, de forma similar a lo realizado en el apartado 8.4.-.
- Se modificó la zona central superior e inferior del cradle, incluyendo el cerramiento de dichas zonas, vigas en cajón para los anillos y rigidizadores radiales.
- Se modificó el perfil de las vigas transversales que soportan la zona central superior e inferior del cradle a un perfil en C para tratar de aligerar la estructura.
- Se añadieron agujeros pasantes en la zona central inferior del cradle para permitir el paso del eje de los motores de giro, los cuales pasarán a descansar sobre la superficie inferior del cradle.
- Los *bogies* sobre los que irán montadas las ruedas de apoyo se instalarán sobre los pilares del cradle.

Para una información más detallada, consultar el documento *Planos* (el diseño definitivo del cargador no se definirá hasta finalizar el análisis mediante el método de los elementos finitos descrito en el próximo capítulo).

11.2.2.- Generación del modelo CAD

El modelo tridimensional CAD del diseño definitivo del cradle será generado a partir de superficies ideales sin grosor. La tabla inferior resume el proceso seguido para obtener dicho modelo:

ZONA CENTRAL INFERIOR	
	
ZONA CENTRAL SUPERIOR	
	

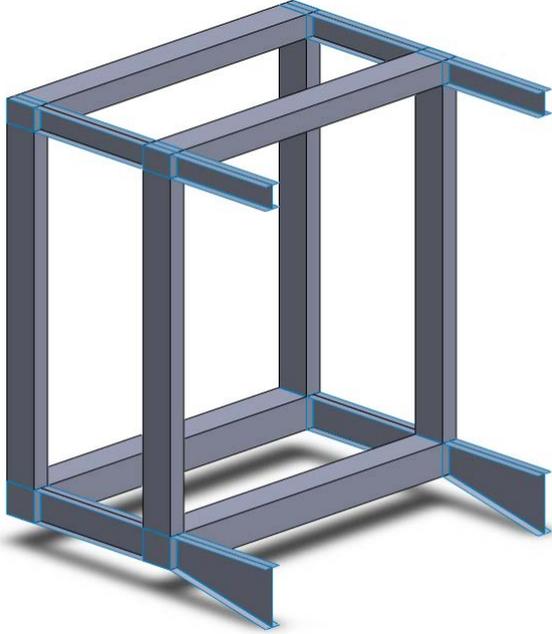
<p>PILARES</p>	
<p>ZONA LATERAL</p>	
<p>ENSAMBLAJE</p>	

Tabla 11.1 - Generación del modelo tridimensional CAD del cradle

A continuación, se incluye una imagen renderizada del modelo anterior:



Figura 11.2 – Vista lateral renderizada del modelo tridimensional CAD del cradle

El modelo será exportado en formato IGES, formato neutro que permitirá su lectura por parte de otro software. Posteriormente, se introducirá el archivo IGES en ANSYS, donde se definirá el arriostramiento del cradle y se asignará un grosor a cada superficie, entre otras propiedades.

11.3.- MODELADO DE LA BASE Y LA TORRE

Finalmente, el presente apartado incluye una descripción del diseño definitivo de la base y de la torre, así como el proceso seguido para la generación del archivo CAD del mismo.

11.3.1.- Diseño definitivo

El diseño definitivo de la base y la torre se obtuvo a partir del modelo alámbrico definido en capítulos anteriores. El único cambio introducido en el mismo se trata del ajuste de las dimensiones del anillo central de la base para asegurar la continuidad con el anillo inferior del cradle, de forma similar a lo realizado en el apartado 8.4.-.

Para una información más detallada, consultar el documento *Planos* (el diseño definitivo del cargador no se definirá hasta finalizar el análisis mediante el método de los elementos finitos descrito en el próximo capítulo).

11.3.2.- Generación del modelo CAD

El modelo tridimensional CAD del diseño definitivo de la base y la torre será generado como un croquis tridimensional consistente únicamente en entidades lineales. La imagen inferior muestra el modelo en cuestión:

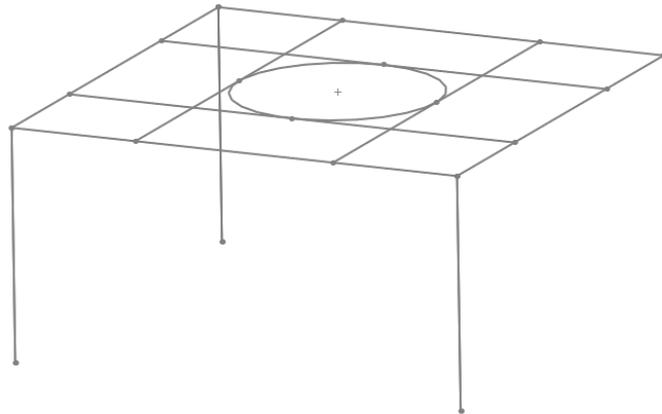


Figura 11.3 - Modelo tridimensional CAD de la base y la torre

El modelo será exportado en formato IGES, formato neutro que permitirá su lectura por parte de otro software. Posteriormente, se introducirá el archivo IGES en ANSYS, donde se definirá el arriostramiento de la torre y se asignará una sección a cada línea, entre otras propiedades.

12. Análisis mediante el método de los elementos finitos en ANSYS

El presente capítulo recoge el análisis mediante el método de los elementos finitos llevado a cabo en ANSYS Mechanical APDL 18.1 [24] [25] sobre los modelos tridimensionales definidos previamente.

El cargador será analizado en su posición más desfavorable, es decir, con la pluma totalmente extendida en la posición de 45 °. En cuanto a los casos de carga considerados, se estudiarán los casos más desfavorables, tal y como se indicó en el apartado 7 para el modelo alámbrico del cargador.

El software ANSYS no trabaja con un sistema de unidades determinado. La elección de las unidades empleadas será arbitraria siempre y cuando se asegure la consistencia de los datos introducidos en el programa. La tabla inferior muestra las unidades empleadas para las distintas magnitudes consideradas:

Magnitud	Unidad
Fuerza	N
Distancia	mm
Presión	MPa
Masa	Kg
Densidad	Kg/mm ³
Aceleración	m/s ²

Tabla 12.1 - Magnitudes y unidades consideradas

Por otro lado, el programa genera un archivo de extensión .log que contiene un código con la información de todas las operaciones realizadas sobre el modelo. De esta forma, se trabajará con fragmentos de dicho código para reproducir los distintos casos de carga considerados. Además, se empleará un fragmento de código predefinido para llevar a cabo un cálculo a pandeo lineal que considere diez modos de pandeo distintos.

El proceso seguido para la obtención de los resultados incluidos en este capítulo consistió en la utilización de los perfiles calculados en Robot como primera aproximación, los cuales fueron optimizados a través de un cálculo estático en ANSYS. Posteriormente, también se llevará a cabo un cálculo a pandeo, reforzando aquellos perfiles que no cumplan un determinado coeficiente de seguridad.

12.1.- ANÁLISIS DE LA PLUMA

En primer lugar, se analizará el modelo generado para la pluma. El presente apartado incluye una descripción del procesamiento y resultados obtenidos a partir de dicho modelo.

12.1.1.- Preprocesamiento

Una vez importado al espacio de trabajo el archivo IGES generado previamente, se llevará a cabo un preprocesamiento del modelo. A continuación, se incluye una descripción de dicho proceso:

- **Tipo de elemento.** Se emplean elementos del tipo BEAM189 para todas las vigas que conforman la geometría de la pluma y elementos del tipo LINK180 para el arriostamiento.
Además, se emplearán elementos del tipo SHELL181 para definir las superficies de apoyo de la pluma y elementos del tipo TARGE170 y CONTA175 para definir el contacto entre la pluma y las superficies de apoyo (las cuales representan las ruedas de apoyo de la pluma sobre el cradle).
- **Propiedades del material.** Se definen las propiedades del acero a través de una densidad de $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, un módulo de Young de $21 \cdot 10^4$ MPa y un coeficiente de Poisson de 0,30.
- **Secciones.** Se definen las distintas secciones a asignar a cada viga (elementos tipo BEAM) y a cada arriostamiento (elementos tipo LINK).
Además, se asignará un grosor a cada una de las superficies de apoyo (elementos tipo SHELL) para hacer posible su posterior mallado.

SECCIONES	
Vigas longitudinales superiores	HEA 500
Vigas longitudinales inferiores	HEB 600
Vigas transversales verticales	RECT 120x300x5
Vigas transversales horizontales	RECT 500x120x5
Arriostramiento vertical	TCAR 180x3.6
Arriostramiento horizontal	TCAR 120x3.2

Tabla 12.2 - Secciones empleadas en el modelo de la pluma

Como se puede observar, se mantuvo la nomenclatura empleada durante el modelado alámbrico.

Los elementos tipo LINK no se definen a través de sus dimensiones, sino que hay que especificar lo siguiente:

Arriostramiento vertical	Área 2540 mm ² 0,019 kg/mm
Arriostramiento horizontal	Área 1495 mm ² 0,012 kg/mm

Tabla 12.3 - Propiedades elementos tipo LINK de la pluma

- **Modelado.** Se lleva a cabo una operación booleana de superposición para definir correctamente la intersección y unión de las distintas líneas.

Se crean puntos clave (*keypoints*) adicionales (por defecto, cada una de las líneas está delimitada por dos puntos clave) necesarios para definir posteriormente la distribución de cargas. Su comportamiento a la hora de aplicar cargas es equivalente al de un nudo.

Se crean los elementos del tipo LINK que definirán el arriostramiento de la pluma (los elementos del tipo LINK se definen entre nudos, por lo que serán creados posteriormente al mallado del modelo).

Finalmente, se crean los pares de contacto necesarios para definir el apoyo de la pluma sobre el cradle (en algún caso es necesario cambiar el método iterativo seguido para lograr la convergencia). De la misma forma, los elementos del tipo TARGE y CONTA se definen sobre nudos, por lo que serán creados posteriormente al mallado del modelo.

- **Mallado.** Se define un tamaño máximo de elemento de 100 mm y se lleva a cabo el mallado de todos los elementos, dando lugar a la nube de nudos resultante.

Las siguientes imágenes muestran la evolución del modelo de la pluma a lo largo de la etapa de preprocesamiento:

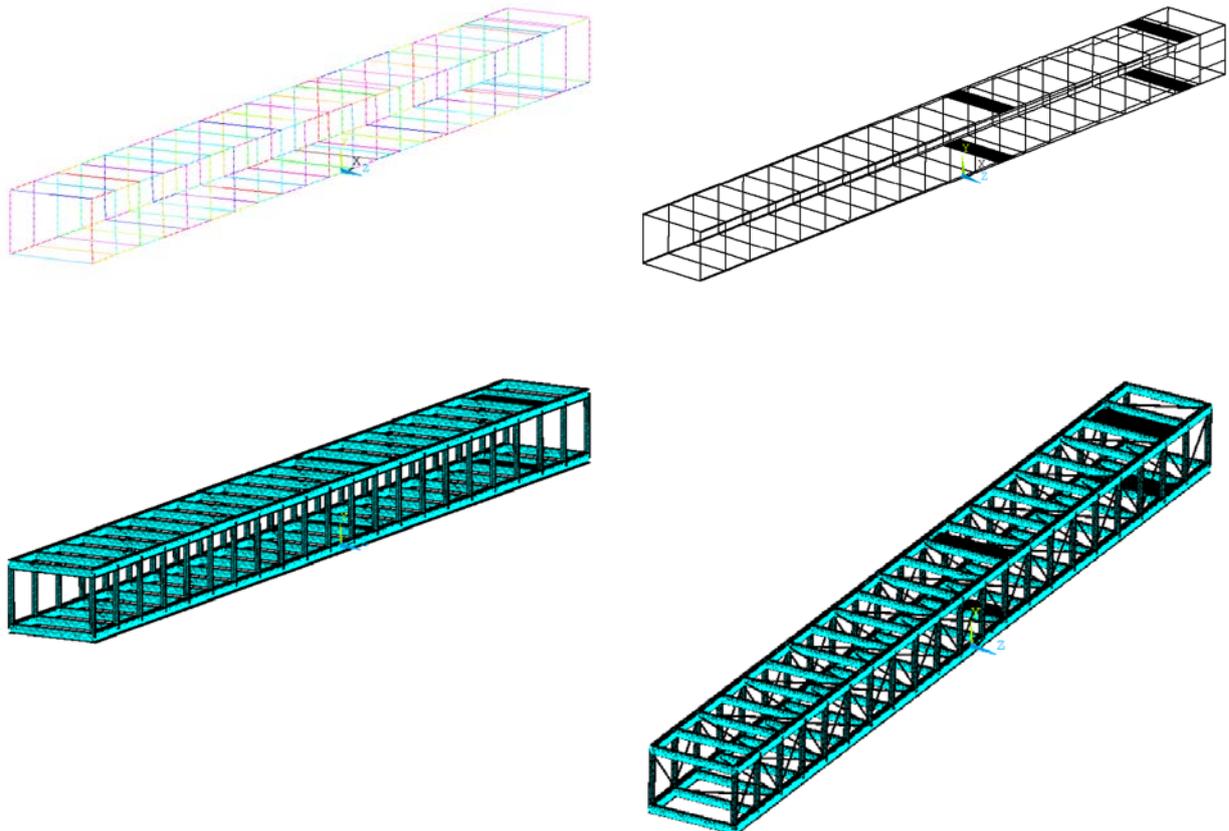


Figura 12.1 - Preprocesamiento del modelo de la pluma

12.1.2.- Cargas por nudo

En este caso, al tratarse de un modelo tridimensional, la distribución de cargas se realizará sobre conjuntos de nudos en lugar de sobre nudos aislados y barras como ocurría en el modelo alámbrico. En concreto, en el caso de la pluma, las cargas se aplicarán directamente sobre puntos clave definidos previamente al mallado.

De forma paralela a lo realizado en el modelo alámbrico, es posible calcular las cargas por elemento a partir del número de puntos clave seleccionados en cada caso. La tabla inferior recoge las distintas cargas por punto clave a tener en cuenta sobre la pluma:

CARGAS POR KEYPOINT PLUMA	
Pluma extendida	
Peso pluma	auto N
Peso cinta (20 keypoints)	5738,85 N
Peso tolva (4 keypoints)	6867,00 N
Peso cadena (44 keypoints)	351,15 N
Peso producto cinta (16 keypoints)	1813,14 N
Peso producto tolva (4 keypoints)	10330,69 N
Peso acumulación suciedad (44 keypoints)	159,85 N
Tensión cinta cola (2 keypoints)	6082,20 N
Tensión cinta cabeza (2 keypoints)	7308,45 N
Carga viento 1 (4 keypoints)	5256,48 N
Carga viento 2 (44 keypoints)	5017,54 N
Carga nieve (44 keypoints)	2926,28 N
Sobrecarga (42 keypoints)	5839,29 N
Carga bloqueo tolva (4 keypoints)	10330,69 N
Carga viento fuera servicio 1 (4 keypoints)	10727,50 N
Carga viento fuera servicio 2 (44 keypoints)	10239,89 N
Viento 1 y 2	
q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F 1	21025,90 N
F 2	220771,95 N
Viento fuera servicio 1 y 2	
q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F 1	42910,00 N
F 2	450555,00 N

Tabla 12.4 – Cargas por punto clave consideradas sobre la pluma

En ANSYS APDL, al aplicar una carga sobre un punto clave en una determinada dirección, se eliminan las cargas definidas previamente en dicha dirección. Por ello, será de vital importancia agrupar las cargas a aplicar en cada zona del modelo para evitar este problema. A continuación, se incluye una tabla con las cargas por punto clave a aplicar en cada zona, así como una representación esquemática de la estructura para facilitar la interpretación de dichas zonas:

CINTA	1			2					
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ			
Peso cinta		-5738,85			-5738,85				
Peso producto cinta		-1813,14			0,00				
	0,00	-7551,99	0,00	0,00	-5738,85	0,00			
Tensión cinta cola	-6082,20								
Tensión cinta cabeza	7308,45								
TOLVA	FX	FY	FZ						
Peso tolva		-6867,00							
Peso producto tolva		-10330,69							
Carga bloqueo tolva		-10330,69							
	0,00	-27528,38	0,00						
CADENA	FX	FY	FZ						
Peso cadena		-351,15							
SUPERFICIE	1			2					
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ			
Peso acumulación suciedad		-159,85			-159,85				
Carga nieve		-2926,28			-2926,28				
Sobrecarga		0,00			-5839,29				
	0,00	-3086,13	0,00	0,00	-8925,41	0,00			
VIENTO	1			2			3		
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Carga viento 1	5256,48			0,00			0,00		
Carga viento 2			0,00			-5017,54			0,00
Carga viento 3	0,00			0,00			-5256,48		
Carga viento fuera servicio 1	10727,50			0,00			0,00		
Carga viento fuera servicio 2			0,00			-10239,89			0,00
Carga viento fuera servicio 3	0,00			0,00			-10727,50		
	15983,98	0,00	0,00	0,00	0,00	-15257,43	-15983,98	0,00	0,00

Tabla 12.5 – Cargas por zona consideradas sobre la pluma

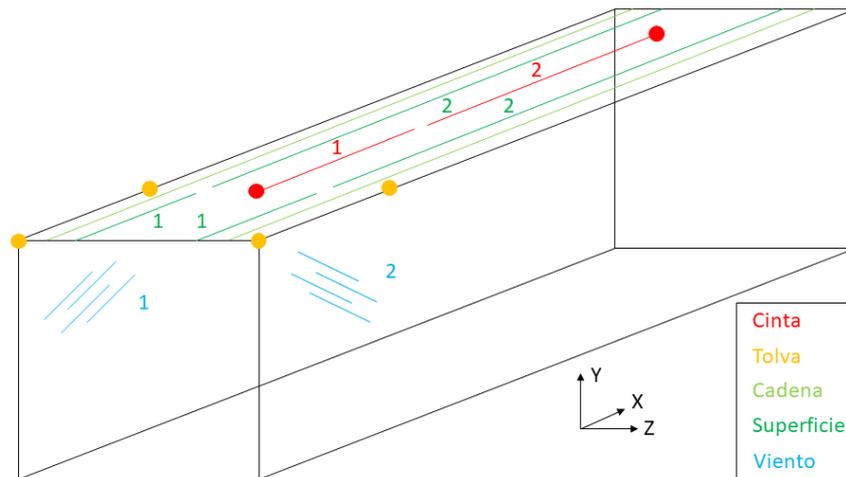


Figura 12.2 – Zonas de aplicación de cargas de la pluma

En función del caso de carga estudiado, se mantendrán o eliminarán las cargas pertinentes incluidas en la tabla anterior.

12.1.3.- Solución

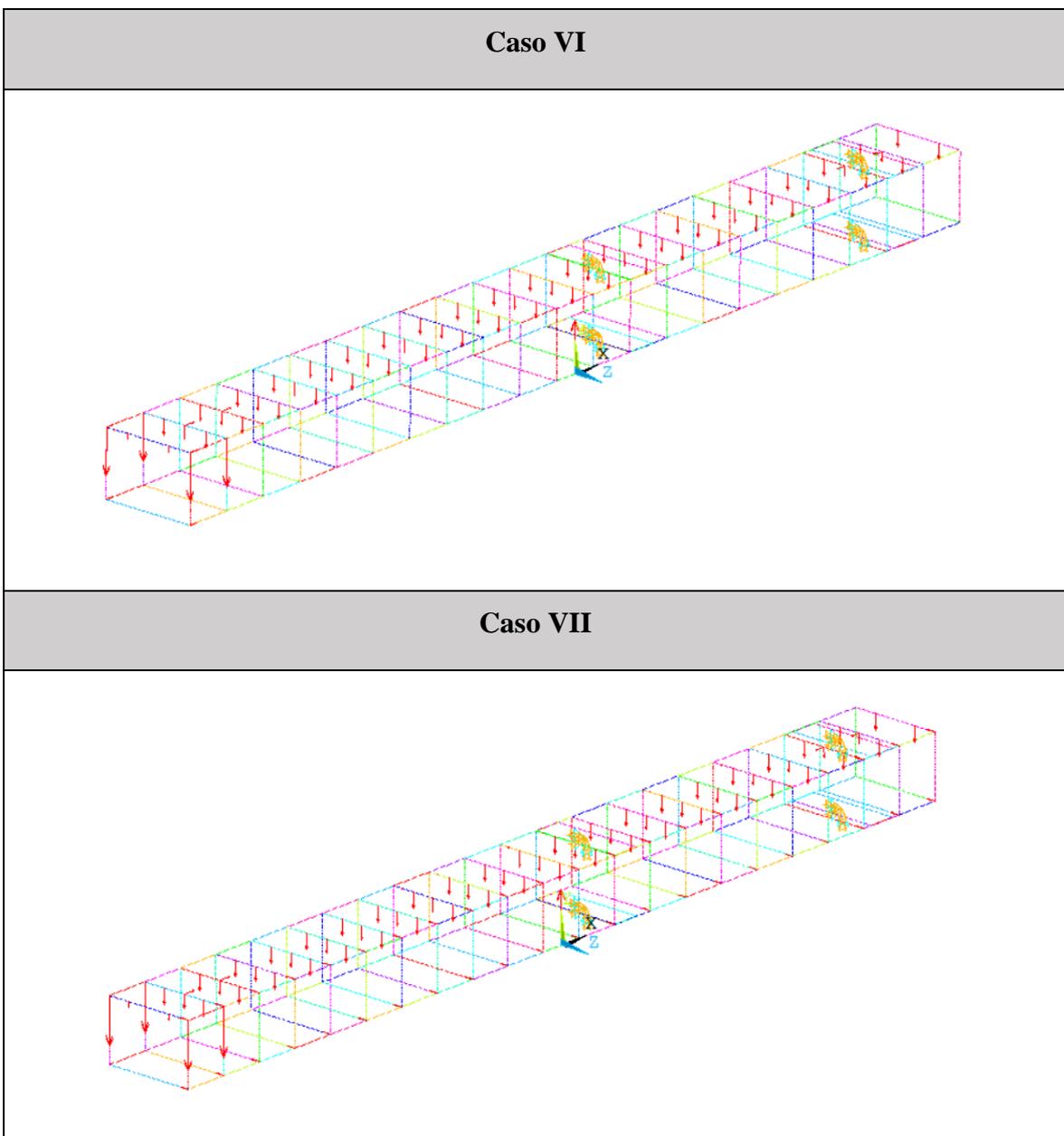
Una vez llevado a cabo el preprocesamiento del modelo y el cálculo de las cargas por nudo, se pasará a la solución del modelo en cuestión, el cual queda resumido en los siguientes puntos:

- **Definición de cargas.** Se definen cargas de tipo estructural, consistentes en fuerzas en determinadas direcciones sobre los nudos pertinentes y una aceleración de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$.

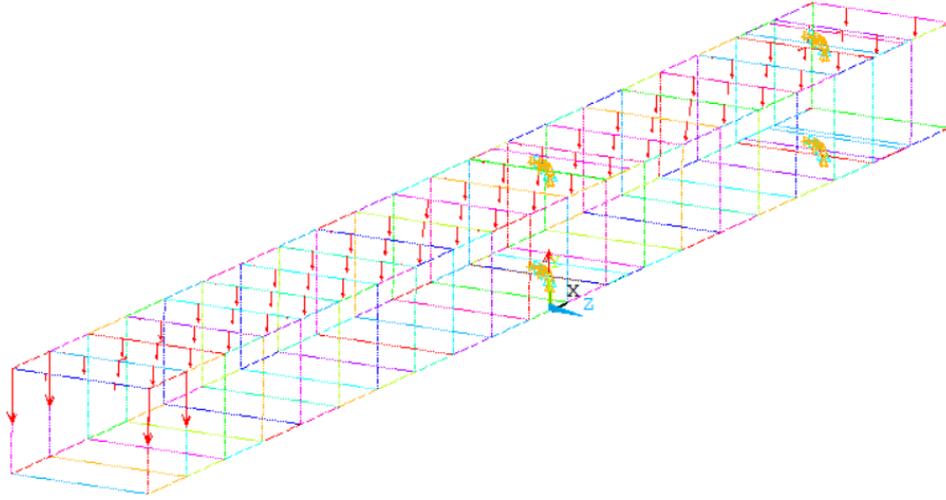
En cuanto a la restricción de movimientos, se hará nulo el movimiento en la dirección longitudinal de los nudos extremos de la pluma para hacer posible el cálculo estático, así como el movimiento en la dirección transversal de los nudos de la pluma contenidos en las superficies de apoyo. El movimiento en la dirección vertical quedará limitado por las superficies de apoyo inferiores y superiores definidas.

- **Solución.** Se lleva a cabo el cálculo mediante el método de los elementos finitos sobre el modelo generado. En este caso, el movimiento de algunos nudos está restringido únicamente en uno de los sentidos de una determinada dirección, por lo que la resolución del problema será no lineal.

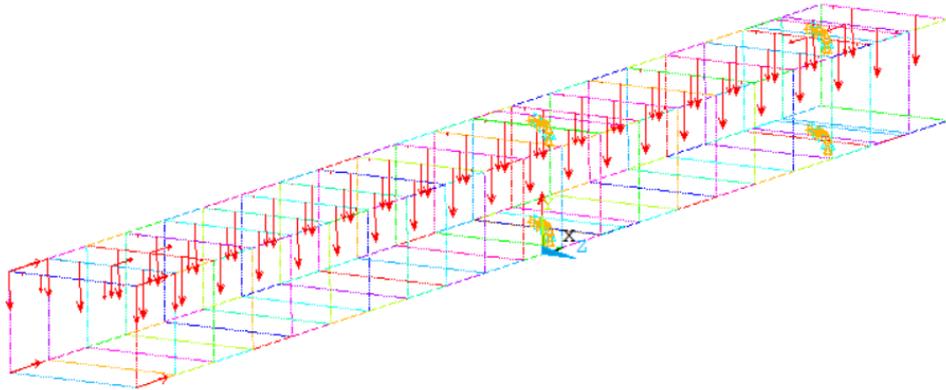
Las imágenes inferiores muestran las cargas aplicadas sobre el modelo en cada uno de los casos de carga estudiados:



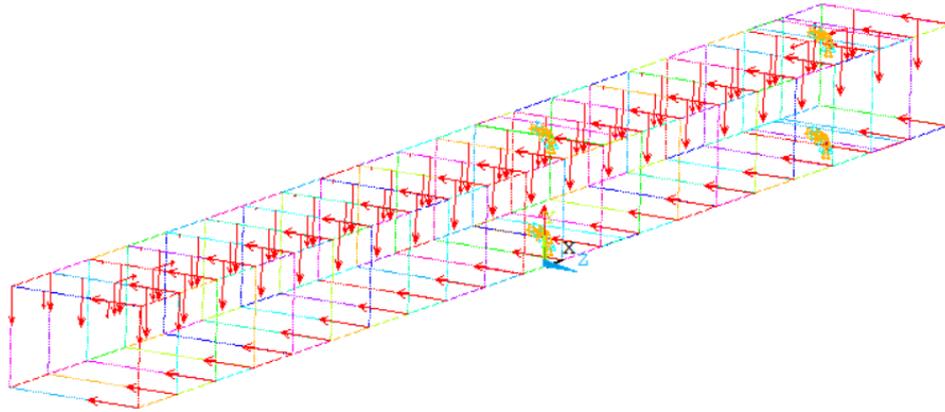
Caso VIII



Caso X



Caso XI



Caso XII

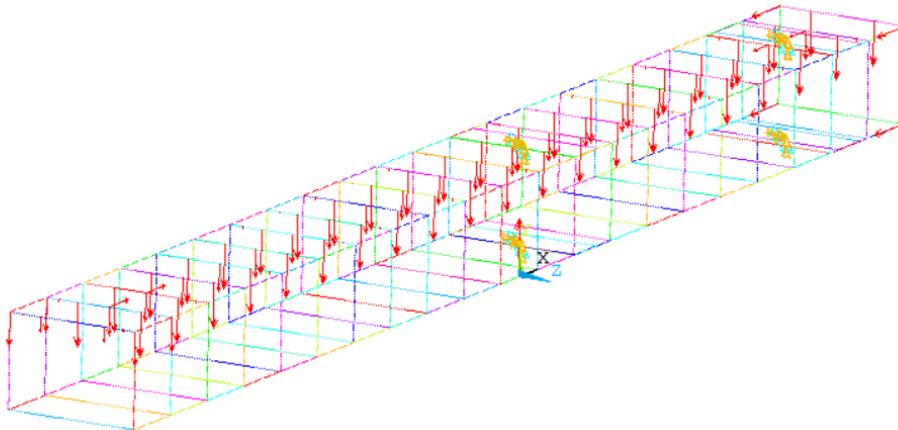


Tabla 12.6 - Cargas aplicadas sobre el modelo de la pluma

Al igual que en Robot, se analizarán los casos de carga más desfavorables en los que los desplazamientos y las tensiones son máximos: cuando se produce el bloqueo de la tolva telescópica o cuando el cargador se encuentra fuera de servicio (además del resto de cargas, en ambos casos) con el viento incidiendo en distintas direcciones.

12.1.4.- Postprocesamiento del cálculo estático lineal

Una vez finalizada la resolución del modelo, se procederá con el postprocesamiento de los resultados, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. En este caso hay un solo conjunto de resultados, por lo que la lectura del primer conjunto será suficiente.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con la masa del modelo y los resultados de desplazamiento en cada nudo, comprobando que se encuentran dentro de los valores admisibles. En cuanto a los resultados de tensión, estos fueron filtrados para representar únicamente tensiones inferiores a los 200 MPa, ya que, tal y como se explica al final del presente apartado, se darán puntos con tensiones superiores a dicho valor, las cuales no son representativas del comportamiento real de la estructura.

Masa				
TOTAL MASS (X,Y,Z)= 69094. 69094. 69094.				
Desplazamiento Caso VI				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	9.5458	-156.36	-0.78660	156.65
Desplazamiento Caso VII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	10.612	-156.34	-18.754	157.76

Desplazamiento Caso VIII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	9.4173	-156.07	-0.78584	156.36
Desplazamiento Caso X				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	6.9154	-112.34	-0.59179	112.55
Desplazamiento Caso XI				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	9.0997	-112.32	-37.259	118.55
Desplazamiento Caso XII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1783	1783	118	1783
VALUE	6.6617	-111.78	-0.59027	111.97

Tabla 12.7 – Masa y desplazamientos máximos de la pluma

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los mapas de tensiones de Von Mises y desplazamientos del modelo.

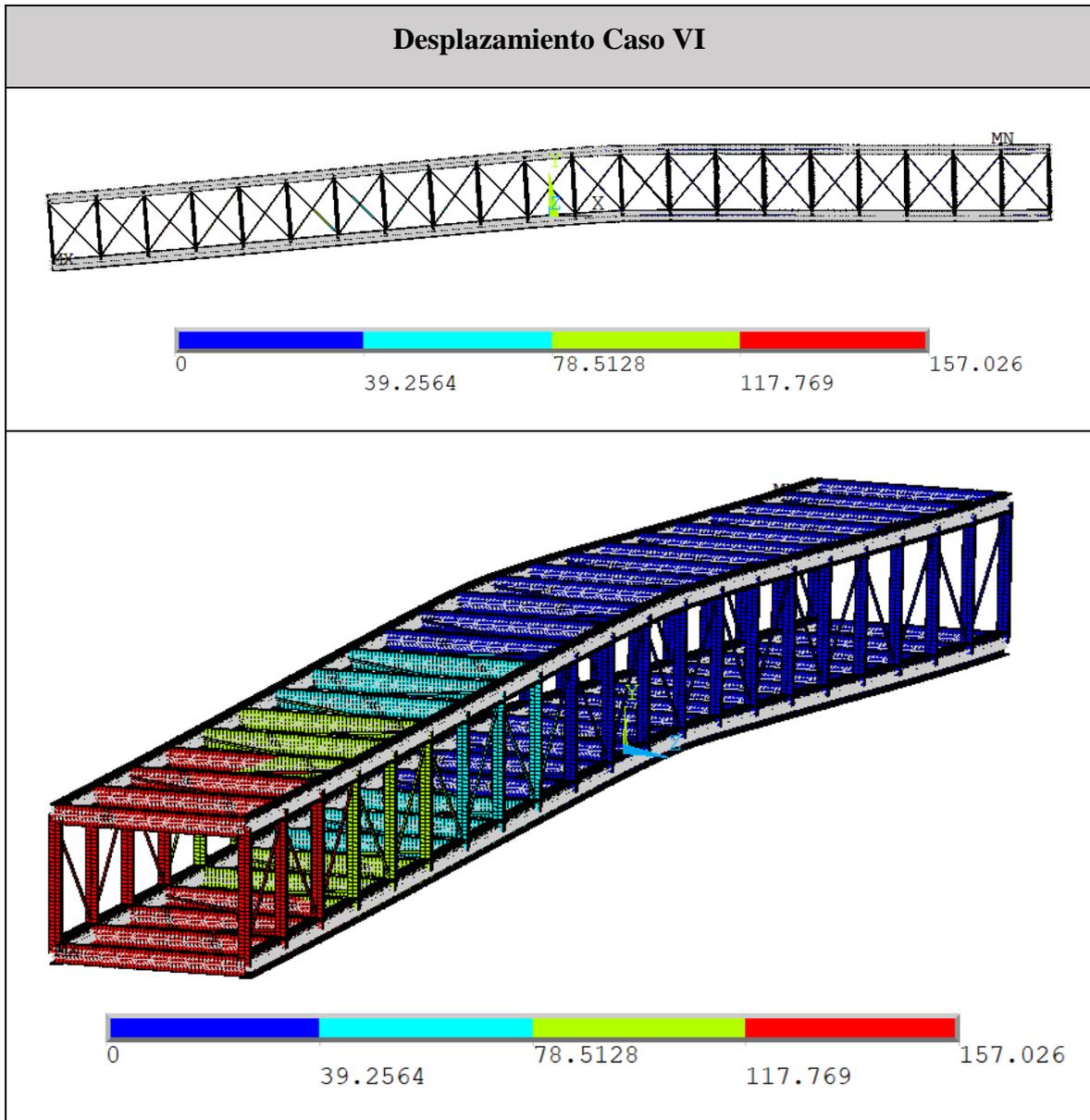


Tabla 12.8 - Desplazamiento de la pluma (caso VI)

Tensión Caso VI

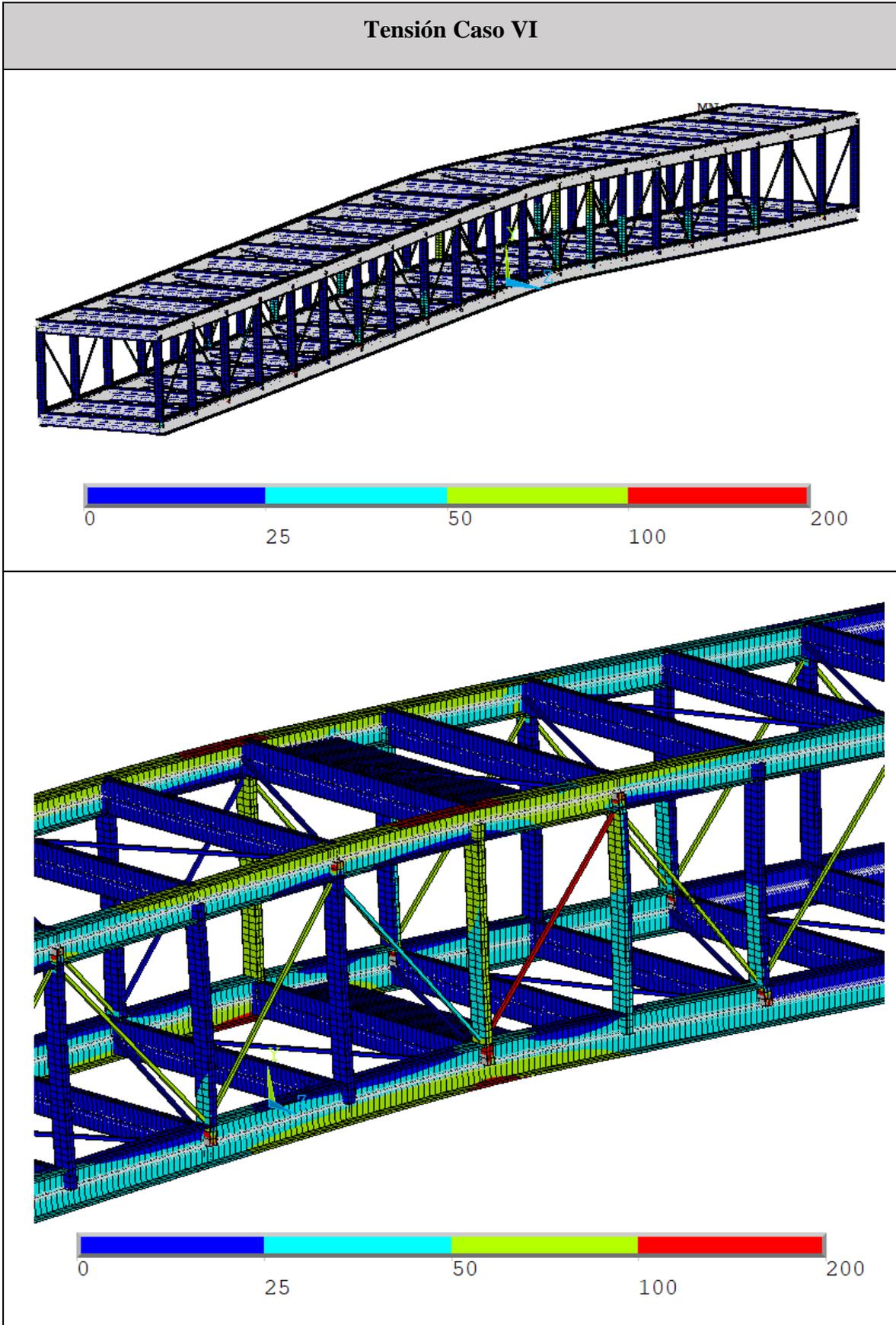


Tabla 12.9 - Tensión de Von Mises en la pluma (caso VI)

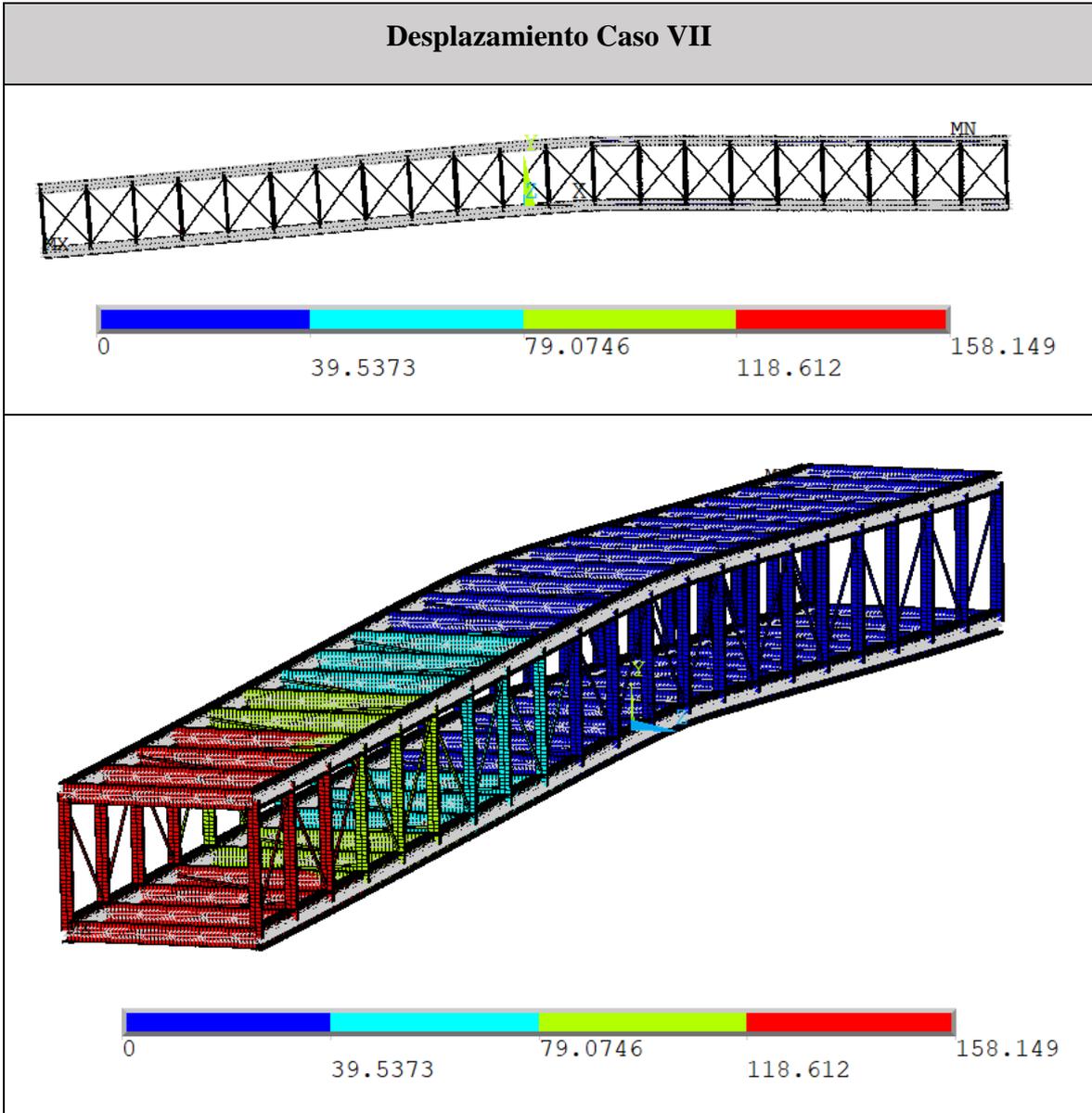


Tabla 12.10 - Desplazamiento de la pluma (caso VII)

Tensión Caso VII

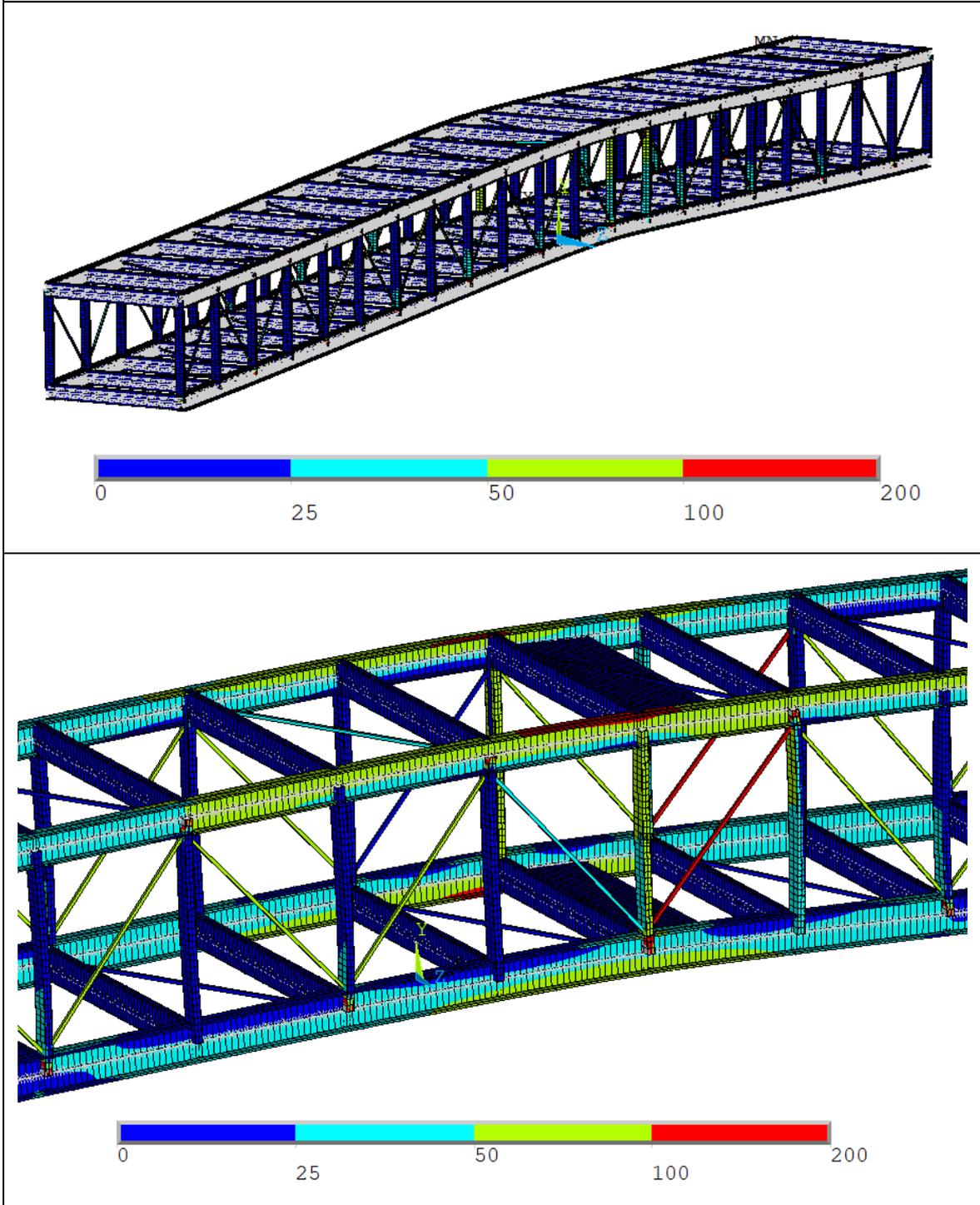


Tabla 12.11 - Tensión de Von Mises en la pluma (caso VII)

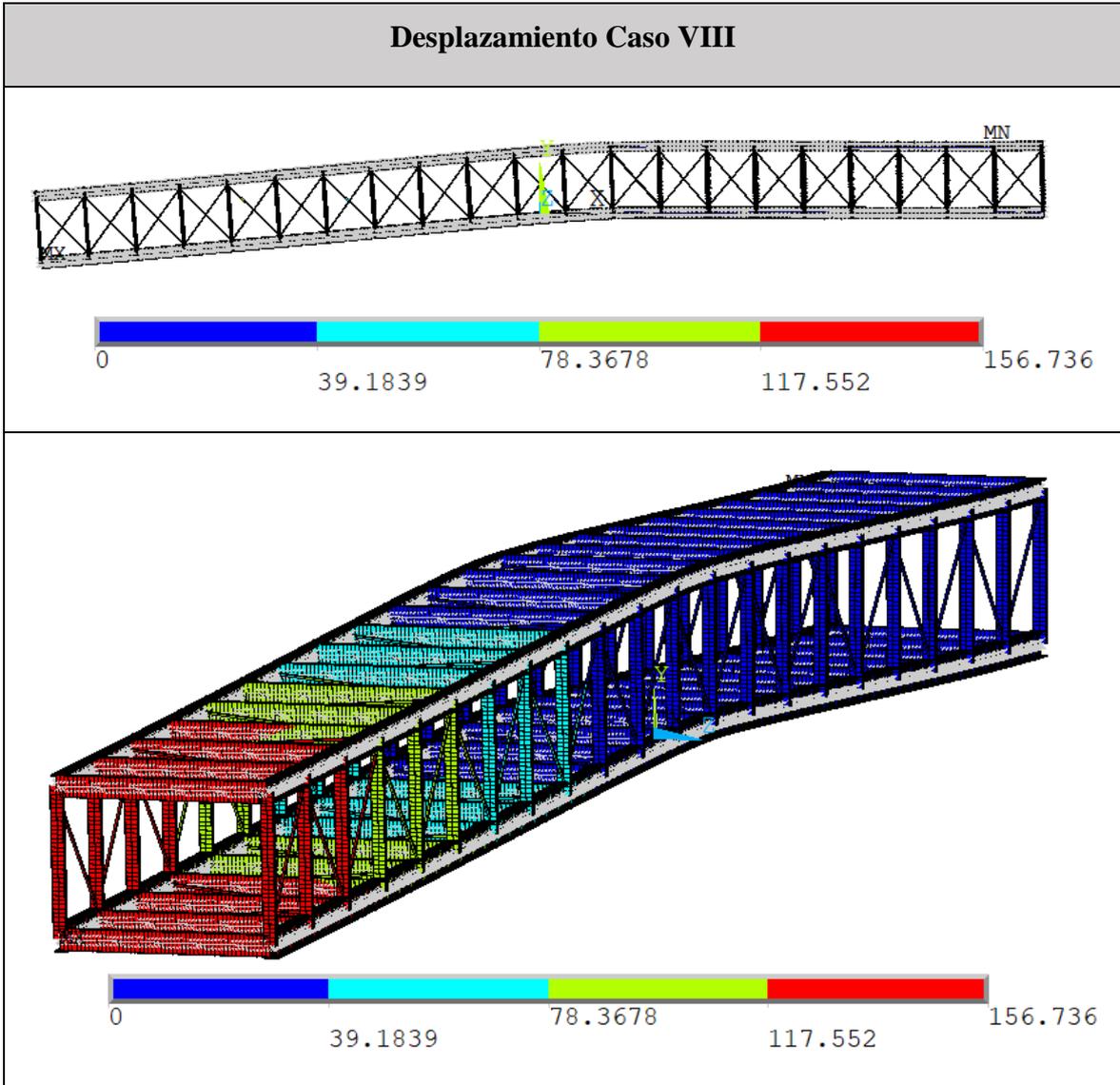


Tabla 12.12 - Desplazamiento de la pluma (caso VIII)

Tensión Caso VIII

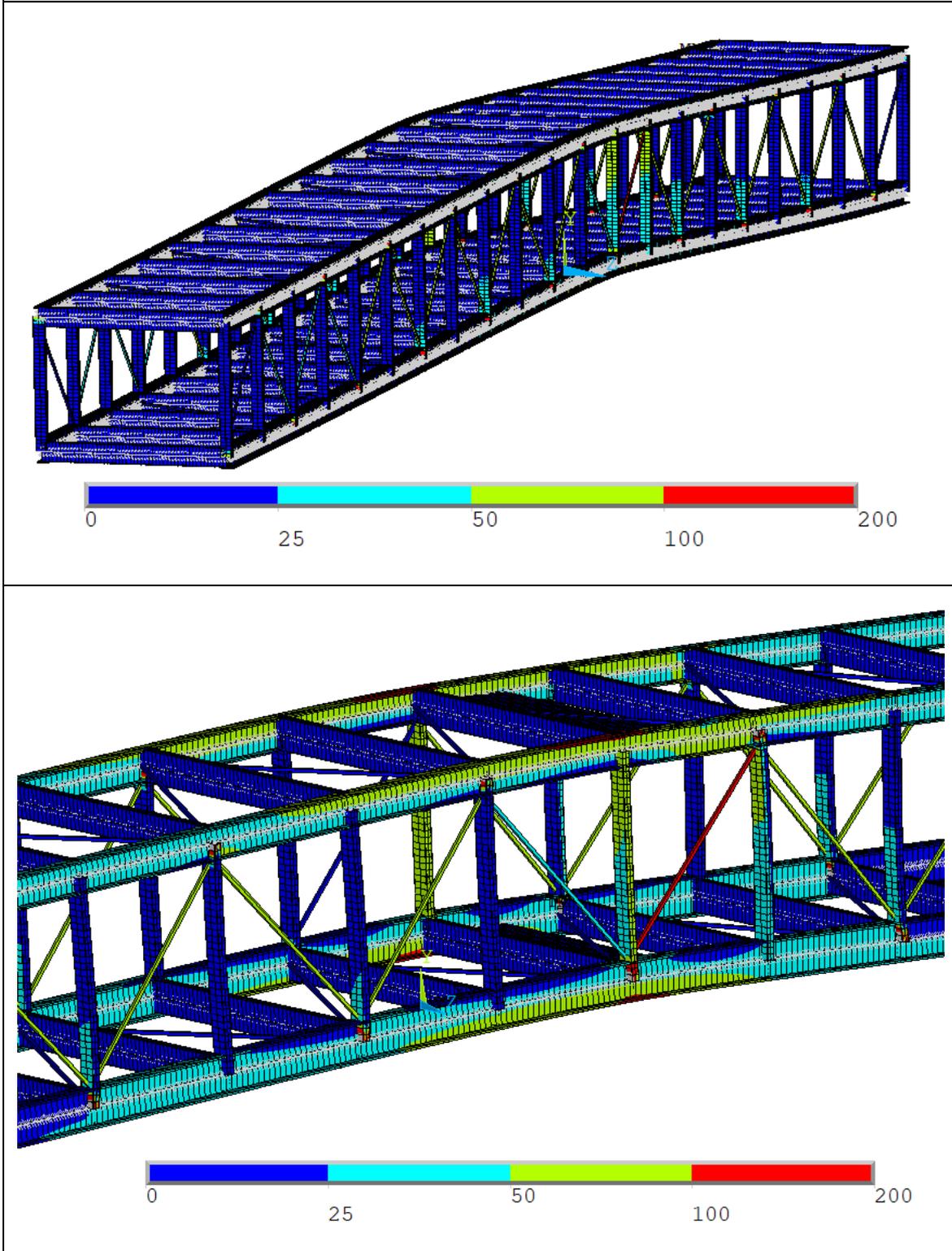


Tabla 12.13 - Tensión de Von Mises en la pluma (caso VIII)

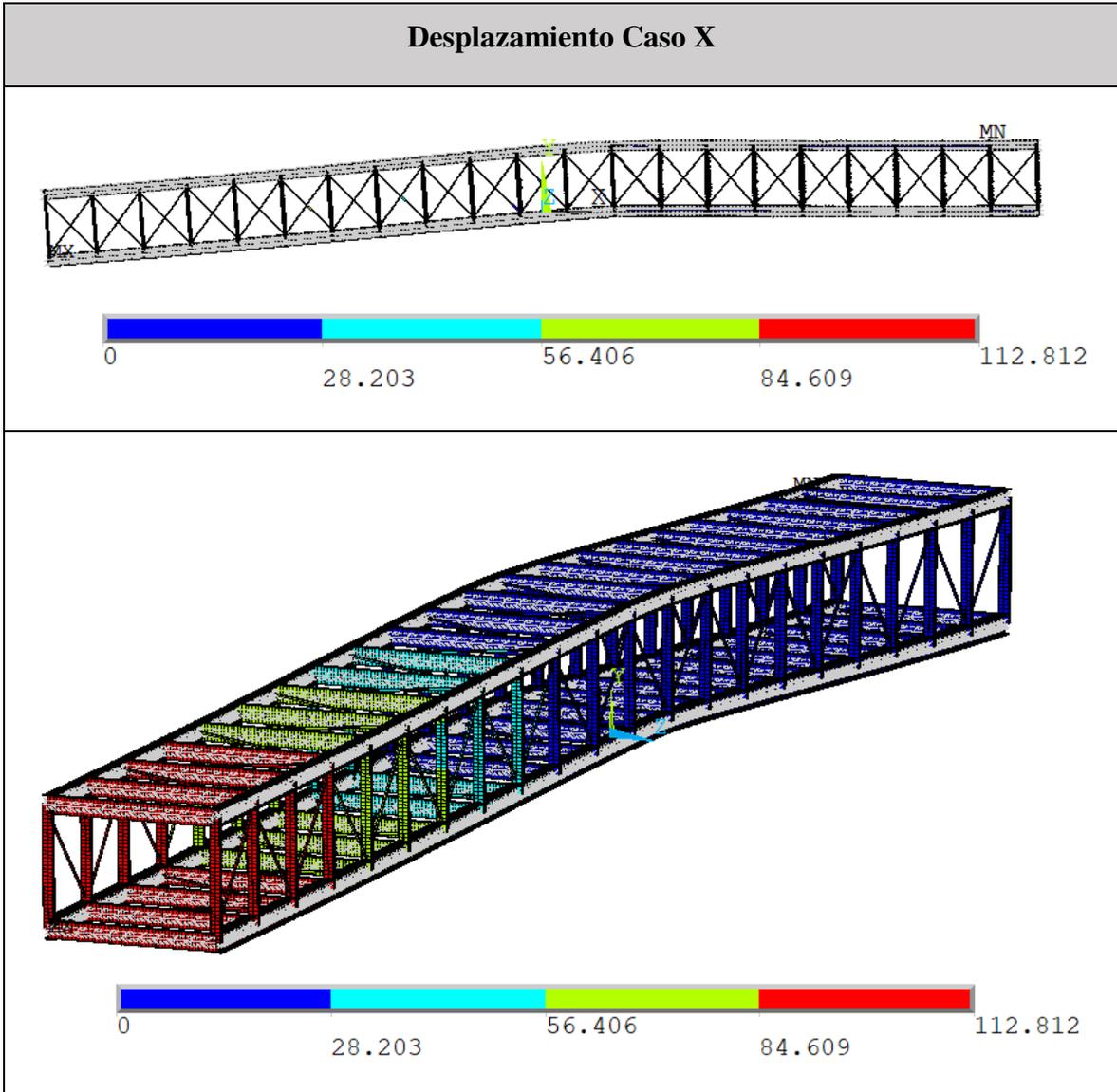


Tabla 12.14 - Desplazamiento de la pluma (caso X)

Tensión Caso X

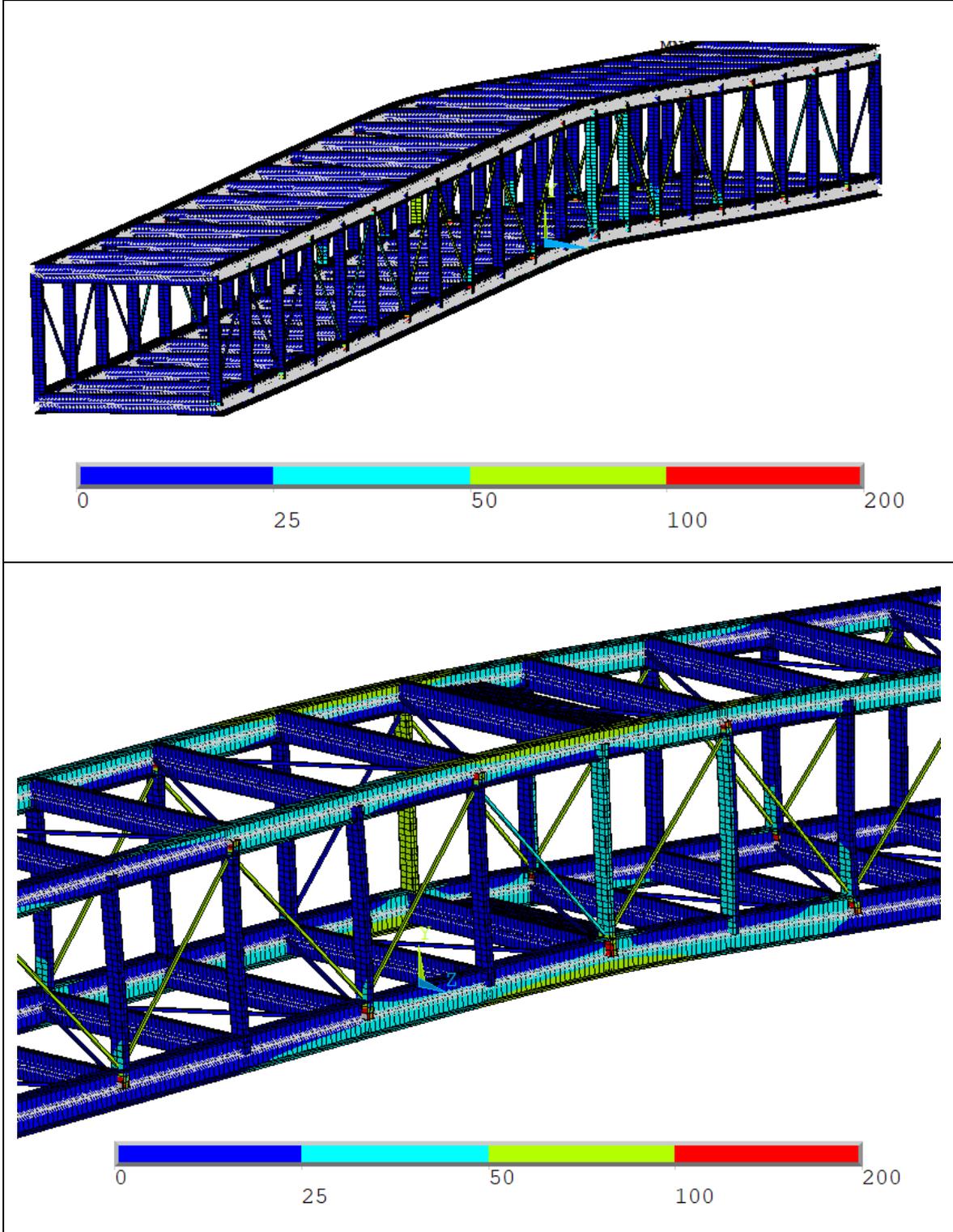


Tabla 12.15 – Tensión de Von Mises en la pluma (caso X)

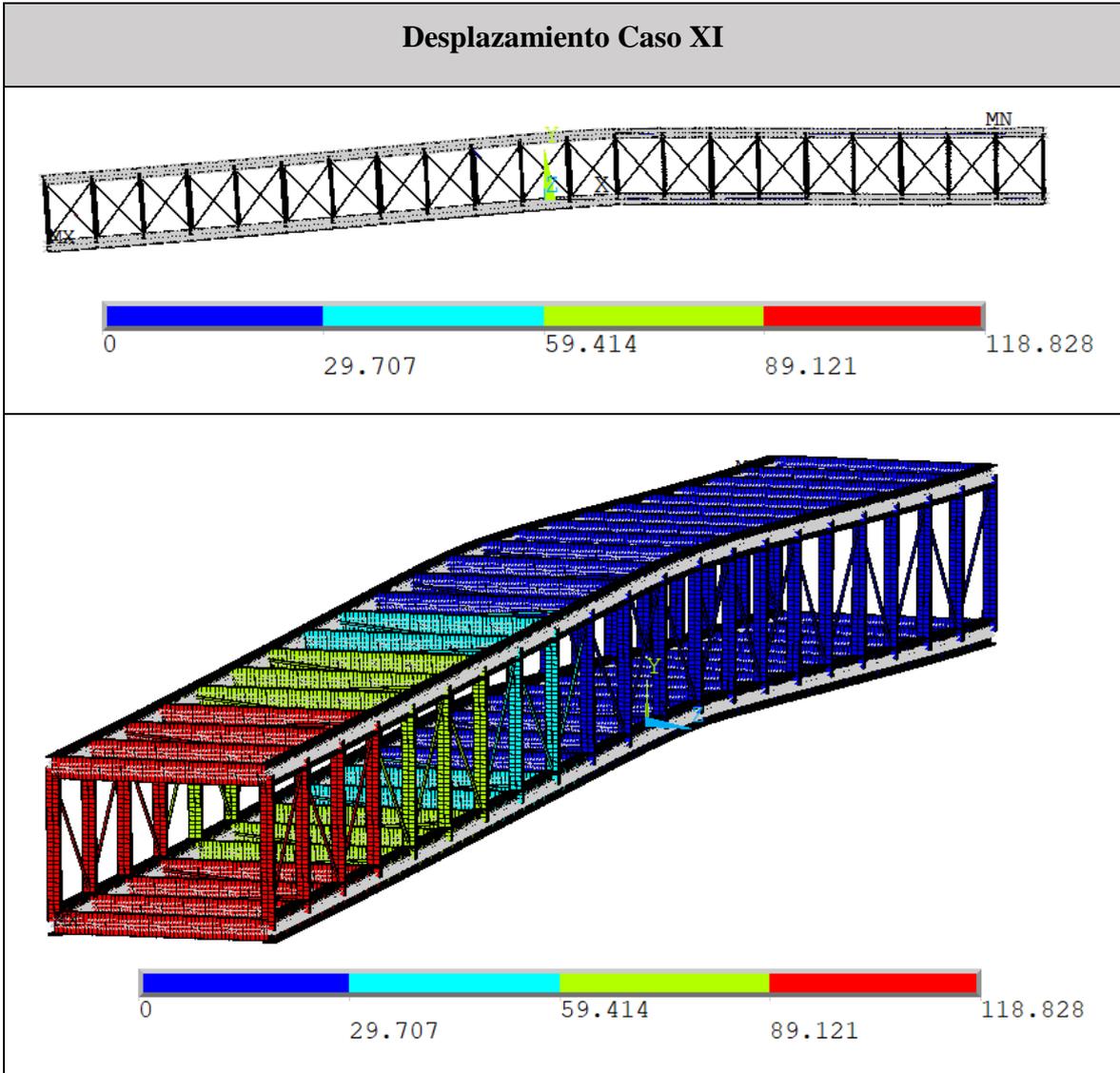


Tabla 12.16 - Desplazamiento de la pluma (caso XI)

Tensión Caso XI

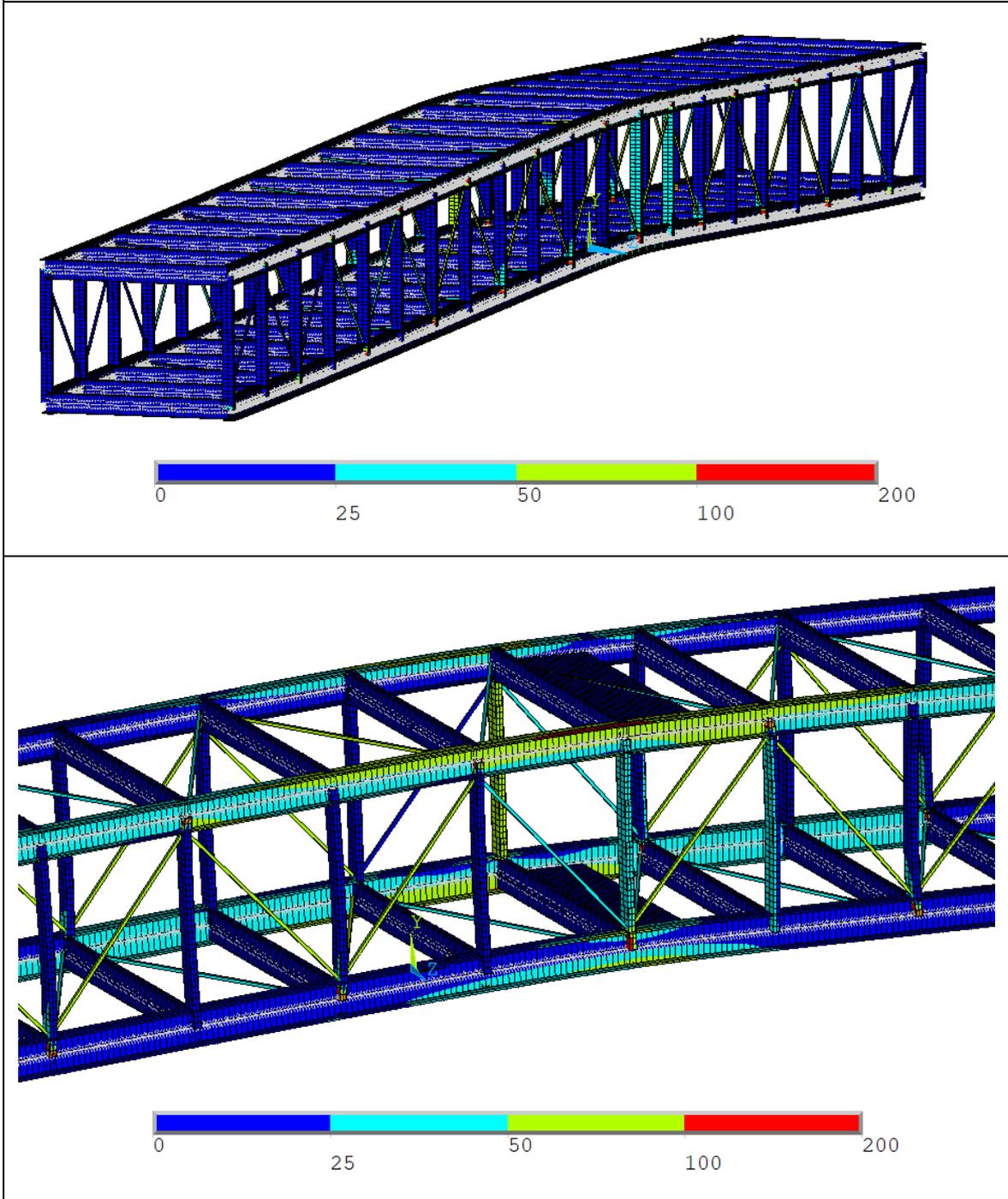


Tabla 12.17 - Tensión de Von Mises en la pluma (caso XI)

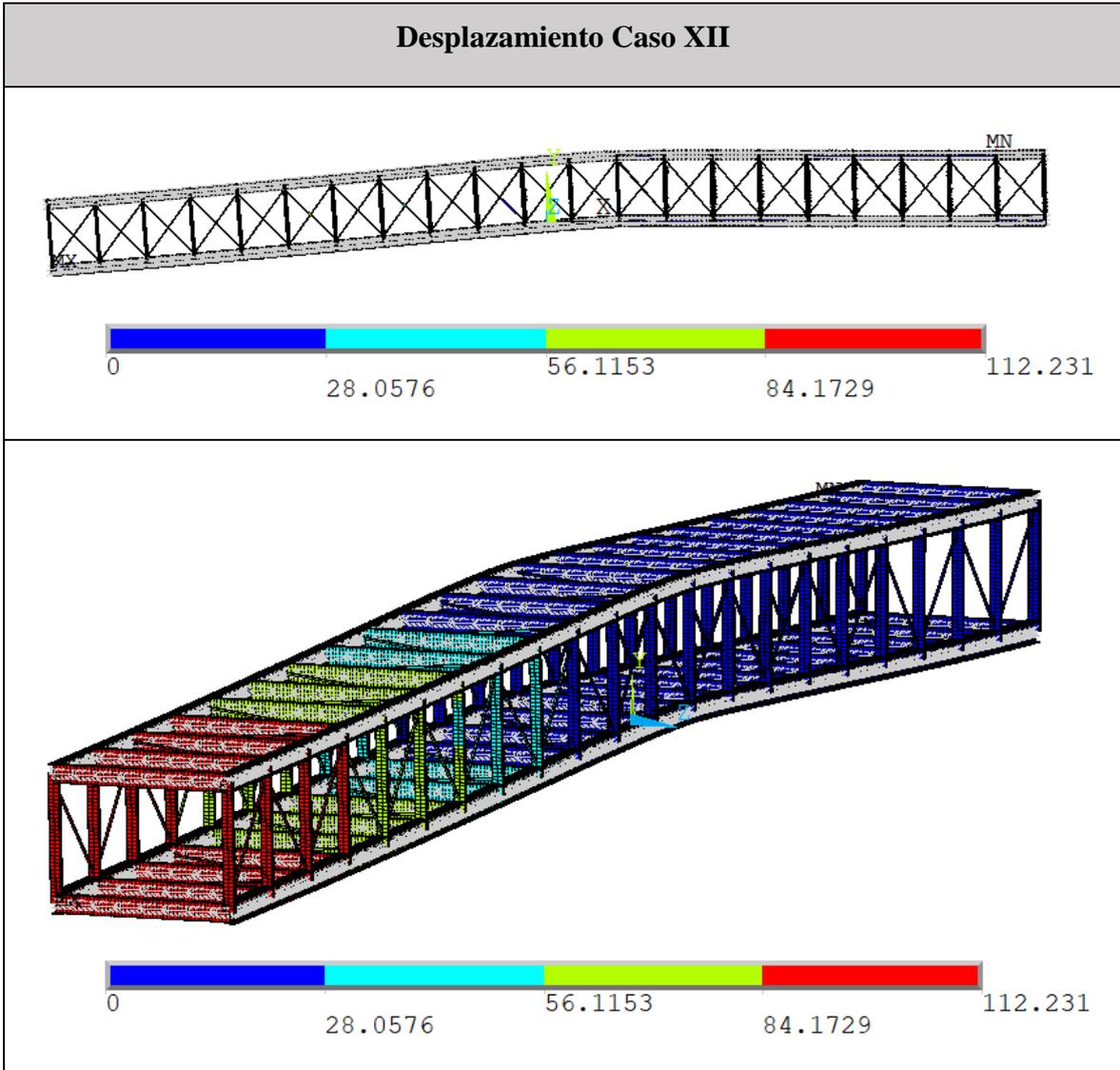


Tabla 12.18 - Desplazamiento de la pluma (caso XII)

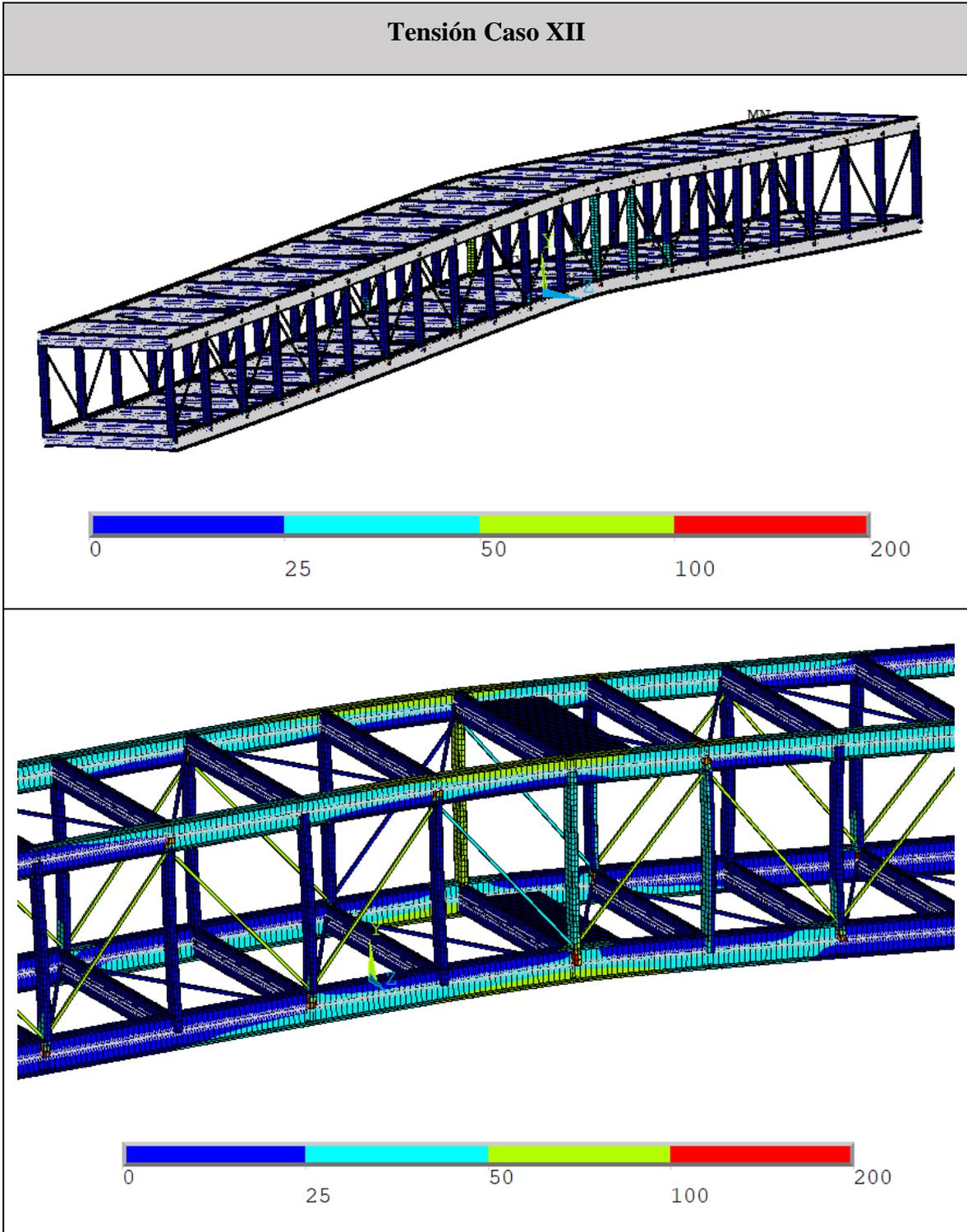


Tabla 12.19 - Tensión de Von Mises en la pluma (caso XII)

Como se puede observar, tras la optimización llevada a cabo en ANSYS, el peso estructural resulta ser unas 16 toneladas mayor al obtenido en el cálculo en Robot.

La máxima flecha se da en el Caso VI (cuando el telescópico está colmatado y el viento incide frontalmente, es decir, el designado como Viento 1 en apartados anteriores) y tiene un valor de 15,64 cm, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos:

$$\frac{15,64}{30,802 \cdot 10^2} = 0,0051 \cong \frac{1}{200} \quad (12.1)$$

Tal y como muestran los mapas de tensiones, estas son máximas en el Caso VII (cuando el telescópico está colmatado y el viento incide lateralmente, es decir, el designado como Viento 2 en apartados anteriores) y tienen un valor máximo comprendido entre 100 y 200 MPa, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos. Únicamente se obtendrán tensiones superiores a 200 MPa en los puntos de unión entre determinadas barras, donde se produce una concentración de tensiones, tal y como muestra la siguiente figura:

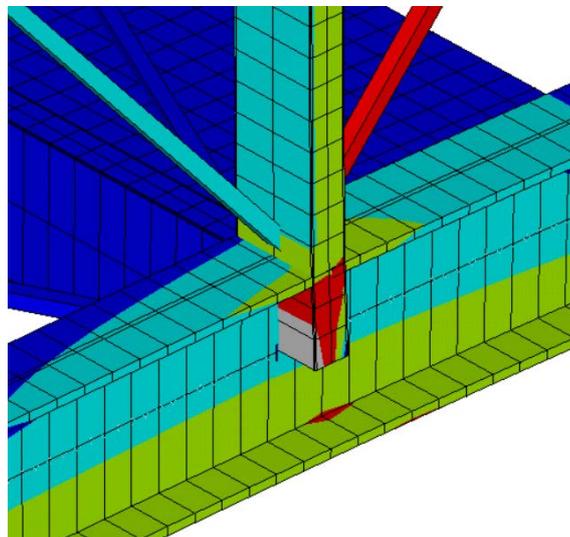


Figura 12.3 - Punto de concentración de tensiones en la pluma

Estos resultados son admisibles, ya que las tensiones generadas en los puntos de unión de las distintas barras únicamente dan lugar a pequeñas deformaciones plásticas en zonas muy reducidas, las cuales no afectan a la integridad estructural. Además, en la realidad, las deformaciones y tensiones generadas son suavizadas mediante redondeos, cartelas y otros elementos de refuerzo.

12.1.5.- Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal

Una vez finalizado el cálculo estático lineal, se introducirán las operaciones del fichero de pandeo para llevar a cabo una comprobación a pandeo lineal, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. Cada uno de los modos de pandeo se corresponde con un conjunto de resultados distinto.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con los valores del coeficiente de pandeo para cada uno de los modos, comprobando que todos ellos sean superiores a tres (un coeficiente de pandeo superior a la unidad asegura que la estructura no sufrirá pandeo, sin embargo, de esta forma, se trabaja del lado de la seguridad).

Coeficiente de pandeo Caso VI				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-4.0390	1	1	1
2	-4.0386	1	2	2
3	-4.0364	1	3	3
4	-4.0358	1	4	4
5	-4.0337	1	5	5
6	-4.0302	1	6	6
7	-4.0242	1	7	7
8	-4.0032	1	8	8
9	-4.0027	1	9	9
10	-3.9675	1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VII				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.4563	1	1	1
2	-3.4530	1	2	2
3	-3.4519	1	3	3
4	-3.4517	1	4	4
5	-3.4502	1	5	5
6	-3.4493	1	6	6
7	-3.4458	1	7	7
8	-3.4415	1	8	8
9	-3.4298	1	9	9
10	-3.4009	1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VIII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-4.0188		1	1	1
2	-4.0183		1	2	2
3	-4.0162		1	3	3
4	-4.0154		1	4	4
5	-4.0125		1	5	5
6	-4.0085		1	6	6
7	-4.0035		1	7	7
8	-3.9837		1	8	8
9	-3.9830		1	9	9
10	-3.9487		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso X					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-5.5824		1	1	1
2	-5.5823		1	2	2
3	-5.5821		1	3	3
4	-5.5793		1	4	4
5	-5.5784		1	5	5
6	-5.5774		1	6	6
7	-5.5582		1	7	7
8	-5.5325		1	8	8
9	-5.5283		1	9	9
10	-5.4754		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso XI					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.7772		1	1	1
2	-3.7771		1	2	2
3	-3.7769		1	3	3
4	-3.7764		1	4	4
5	-3.7753		1	5	5
6	-3.7735		1	6	6
7	-3.7720		1	7	7
8	-3.7684		1	8	8
9	-3.7594		1	9	9
10	-3.7381		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso XII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-5.5076		1	1	1
2	-5.5050		1	2	2
3	-5.5047		1	3	3
4	-5.5037		1	4	4
5	-5.4988		1	5	5
6	-5.4929		1	6	6
7	-5.4848		1	7	7
8	-5.4592		1	8	8
9	-5.4564		1	9	9
10	-5.4062		1	10	10

Tabla 12.20 – Coeficientes de pandeo de la pluma

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los modos de pandeo más desfavorables.

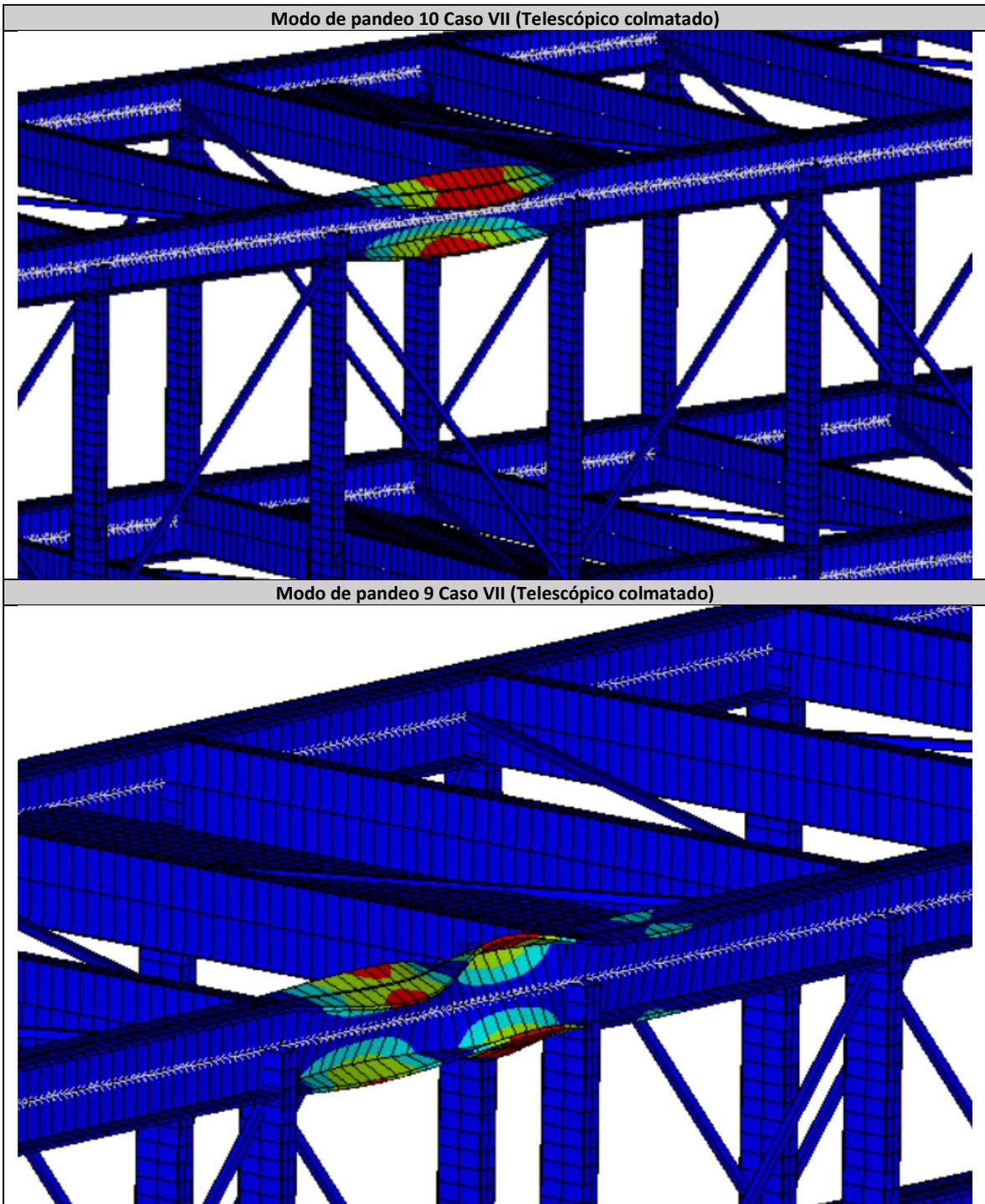


Tabla 12.21 - Modos de pandeo más desfavorables de la pluma

De acuerdo con las imágenes superiores, al igual que ocurría en el modelo alámbrico, en caso de producirse el pandeo, se daría en las barras situadas en las inmediaciones de la zona de apoyo de la pluma sobre el cradle. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

12.2.- ANÁLISIS DEL CRADLE

En segundo lugar, se analizará el modelo generado para el cradle. El presente apartado incluye una descripción del procesamiento y resultados obtenidos a partir de dicho modelo.

12.2.1.- Preprocesamiento

Una vez importado al espacio de trabajo el archivo IGES generado previamente, se llevará a cabo un preprocesamiento del modelo. A continuación, se incluye una descripción de dicho proceso:

- **Tipo de elemento.** Se emplean elementos del tipo SHELL281 para todas las superficies que conforman la geometría del cradle y elementos del tipo LINK180 para el arriostramiento.
- **Propiedades del material.** Se definen las propiedades del acero a través de una densidad de $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, un módulo de Young de $21 \cdot 10^4$ MPa y un coeficiente de Poisson de 0,30.
- **Secciones.** Se definen las distintas secciones a asignar a cada superficie (elementos tipo SHELL) y a cada arriostramiento (elementos tipo LINK).

SECCIONES	
Vigas longitudinales superiores	Perfil en I (Altura 400, grosor 12)
Vigas longitudinales Inferiores	Perfil en I (Altura 550-1000, grosor 14)
Vigas transversales verticales	RECT 300x600x25
Vigas transversales horizontales superiores 1	RECT 600x400x10
Vigas transversales horizontales superiores 2	Perfil en C (600x400x12)
Vigas transversales horizontales inferiores 1	RECT 600x550x10
Vigas transversales horizontales inferiores 2	Perfil en C (600x1000x16)
Arriostramiento vertical	RECT 300x600x5
Arriostramiento horizontal	TCAR 200x5
Anillo superior (viga cajón circular)	RECT 1150x400x10
Anillo superior (cerramiento)	Grosor 10 mm
Anillo superior (rigidizadores radiales)	Grosor 6 mm
Anillo inferior (viga cajón circular)	RECT 1150x1000x30
Anillo inferior (cerramiento)	Grosor 16 mm
Anillo inferior (rigidizadores radiales)	Grosor 12 mm

Tabla 12.22 - Secciones empleadas en el modelo del cradle

Como se puede observar, se mantuvo la nomenclatura empleada durante el modelado alámbrico, excepto en aquellos casos donde fue necesaria la especificación de determinadas propiedades para la correcta definición de los perfiles.

Los elementos tipo LINK no se definen a través de sus dimensiones, sino que hay que especificar lo siguiente:

Arriostramiento vertical	Área 9900 mm ² 0,078 kg/mm
Arriostramiento horizontal	Área 3900 mm ² 0,030 kg/mm

Tabla 12.23 - Propiedades elementos tipo LINK del cradle

- **Modelado.** Se lleva a cabo una operación booleana de superposición para definir correctamente la intersección y unión de las distintas superficies.
Se crean los elementos del tipo LINK que definirán el arriostramiento del cradle (los elementos del tipo LINK se definen entre nudos, por lo que serán creados posteriormente al mallado del modelo).
- **Mallado.** Se define un tamaño máximo de elemento de 100 mm y se lleva a cabo el mallado de todos los elementos, dando lugar a la nube de nudos resultante.

Las siguientes imágenes muestran la evolución del modelo del cradle a lo largo de la etapa de preprocesamiento:

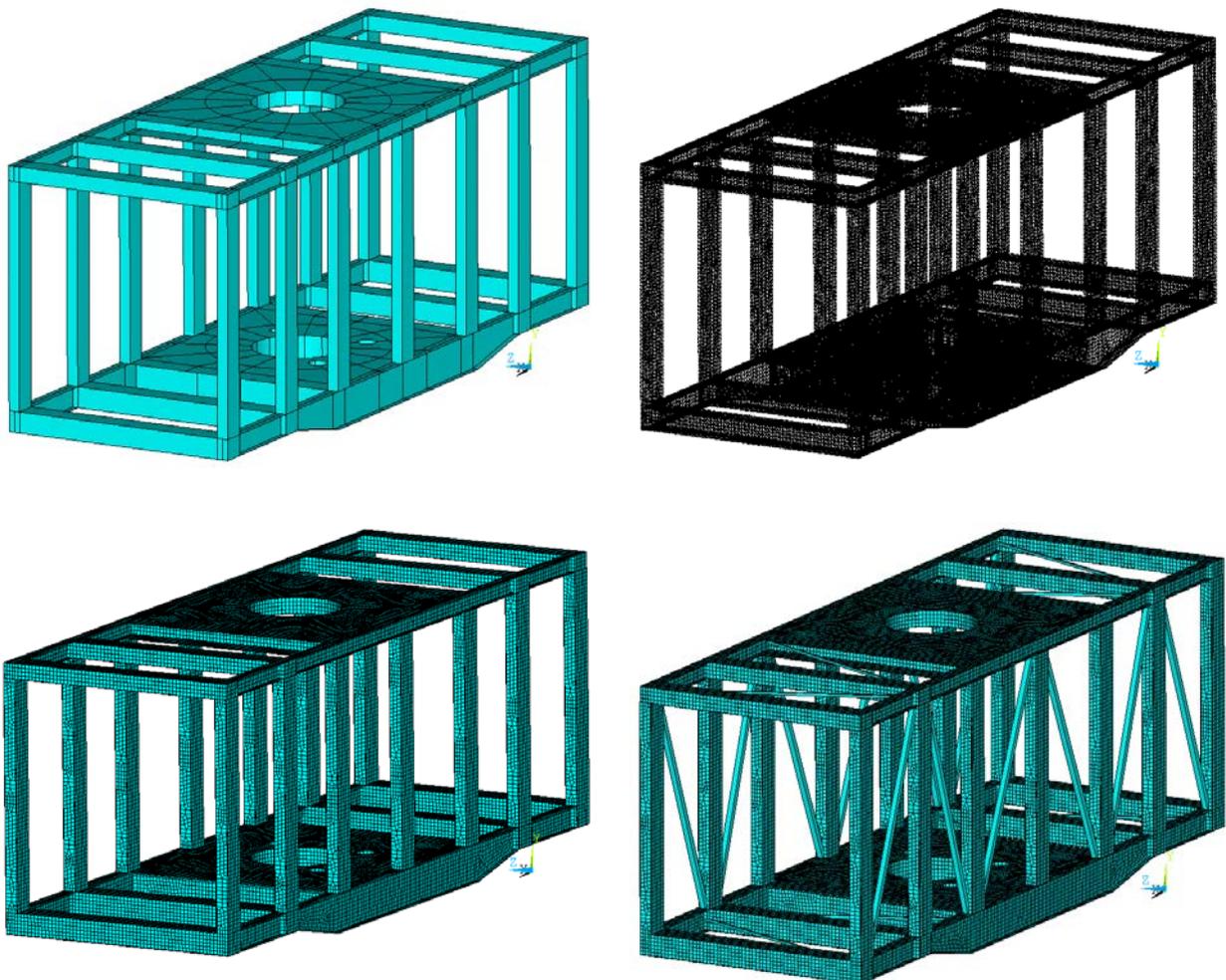


Figura 12.4 -Preprocesamiento del modelo de la base y la torre

12.2.2.- Cargas por nudo

En este caso, al tratarse de un modelo tridimensional, la distribución de cargas se realizará sobre superficies en lugar de sobre nudos y barras como ocurría en el modelo alámbrico. Para ello, se seleccionarán las áreas pertinentes, se seleccionarán los nudos contenidos en dichas áreas y, finalmente, se aplicarán las cargas sobre los nudos.

De forma paralela a lo realizado en el modelo alámbrico, es posible calcular las cargas por elemento a partir del número de nudos seleccionados en cada caso. La tabla inferior recoge las distintas cargas por nudo a tener en cuenta sobre el cradle:

CARGAS POR NUDO CRADLE	
Pluma extendida	
Peso cradle	auto N
Peso pasarelas (1022 nudos)	13,82 N
Peso cabina operario (2306 nudos)	8,51 N
Peso contrapeso (0 nudos)	0,00 N
Peso cabina control (339 nudos)	144,69 N
Peso accionamiento traslación (2366 nudos)	12,44 N
Peso ruedas apoyo (292 nudos)	839,90 N
Peso pluma, cinta, tolva izda (80 nudos)	10785,62 N
Peso pluma, cinta, tolva dcha (66 nudos)	-3100,17 N
Peso cinta alimentación (1144 nudos)	257,26 N
Peso producto cinta, producto tolva izda (80 nudos)	2184,05 N
Peso producto cinta, producto tolva dcha (66 nudos)	-1581,68 N
Peso producto cinta alimentación (1144 nudos)	128,63 N
Peso acumulación suciedad (25258 nudos)	0,03 N
Peso acumulación suciedad pluma izda (80 nudos)	110,15 N
Peso acumulación suciedad pluma dcha (66 nudos)	-26,95 N
Carga viento 1 (3534 nudos)	13,67 N
Carga viento 2 (16141 nudos)	8,98 N
Carga viento pluma 2 izda (73 nudos)	3789,08 N
Carga viento pluma 2 dcha (73 nudos)	-764,81 N
Carga viento galería horizontal (1144 nudos)	124,83 N
Carga viento galería vertical (1144 nudos)	24,97 N
Carga nieve cradle (25258 nudos)	2,10 N
Carga nieve pluma izda (80 nudos)	2016,47 N
Carga nieve pluma dcha (66 nudos)	-493,35 N
Sobrecarga (1022 nudos)	86,39 N
Sobrecarga pluma izda (80 nudos)	3628,00 N
Sobrecarga pluma dcha (66 nudos)	-681,66 N

Carga bloqueo tolva izda (80 nudos)	1364,57	N
Carga bloqueo tolva dcha (66 nudos)	-1027,92	N
Carga viento fuera servicio 1 (3534 nudos)	27,89	N
Carga viento fuera servicio 2 (16141 nudos)	18,32	N
Carga viento fuera servicio pluma 2 izda (73 nudos)	7732,81	N
Carga viento fuera servicio pluma 2 dcha (73 nudos)	-1560,83	N
Carga viento fuera servicio galería horizontal (1144 nudos)	254,76	N
Carga viento fuera servicio galería vertical (1144 nudos)	50,95	N
Pluma, cinta y tolva		
F	67098,69	kg
d	14,60	m
a	9,00	m
Ri	87956,09	kg
Rd	-20857,40	kg
Producto cinta y tolva		
F	7169,52	kg
d	35,72	m
a	9,00	m
Ri	17810,78	kg
Rd	-10641,27	kg
Acumulación suciedad pluma		
F	716,95	kg
d	13,55	m
a	9,00	m
Ri	898,26	kg
Rd	-181,31	kg
Viento 1 y 2		
q (35 m/s)	750,93	N/m ²
F 1	48299,50	N
F 2	144898,49	N
Viento pluma 2		
F	22504,79	kg
d	13,55	m
a	9,00	m
Ri	28196,00	kg
Rd	-5691,21	kg
Viento cinta alimentación		
q (35 m/s)	750,93	N/m ²
F H	142808,61	N
M	42842,58	Nm
F V	28561,72	N

Nieve pluma		
F	13125,00	kg
d	13,55	m
a	9,00	m
Ri	16444,17	kg
Rd	-3319,17	kg
Sobrecarga pluma		
F	25000,00	kg
d	12,30	m
a	9,00	m
Ri	29586,11	kg
Rd	-4586,11	kg
Bloqueo tolva		
F	4212,31	kg
d	38,55	m
a	9,00	m
Ri	11127,99	kg
Rd	-6915,68	kg
Viento fuera servicio 1 y 2		
q (50 m/s)	1532,50	N/m ²
F 1	98570,40	N
F 2	295711,20	N
Viento fuera servicio pluma 2		
F	45928,13	kg
d	13,55	m
a	9,00	m
Ri	57542,85	kg
Rd	-11614,71	kg
Viento fuera servicio cinta alimentación		
q (50 m/s)	1532,50	N/m ²
F H	291446,15	N
M	87433,84	Nm
F V	58289,23	N

Tabla 12.24 - Cargas por nudo consideradas sobre el cradle

En ANSYS APDL, al aplicar una carga sobre un nudo en una determinada dirección, se eliminan las cargas definidas previamente en dicha dirección. Por ello, será de vital importancia agrupar las cargas a aplicar en cada zona del modelo para evitar este problema. A continuación, se incluye una tabla con las cargas por nudo a aplicar en cada zona, así como una representación esquemática de la estructura para facilitar la interpretación de dichas zonas:

PASARELAS	1											
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Peso pasarelas		-13,82										
Sobrecarga		-86,39										
Peso cabina control	0,00	-100,21	0,00									
		-144,69										
SUPERFICIE	1			2			3			4		
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Peso cabina operario		0,00			-8,51			-8,51				0,00
Peso accionamiento traslación		0,00			0,00			-12,44				-12,44
Peso acumulación suciedad		-0,03			-0,03			-0,03				-0,03
Carga nieve cradle		-2,10			-2,10			-2,10				-2,10
Peso cabina control	0,00	-2,12	0,00	0,00	-10,63	0,00	0,00	-23,07	0,00	0,00	0,00	-14,56
RUEDAS	1			2			3					
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Peso ruedas apoyo		-839,90			-839,90			-839,90				
Peso pluma, cinta, tolva		-10785,62			3100,17			0,00				
Peso producto cinta, producto tolva		-2184,05			1581,68			0,00				
Peso acumulación suciedad pluma		-110,15			26,95			0,00				
Carga nieve pluma		-2016,47			493,35			0,00				
Sobrecarga pluma		-3628,00			681,66			0,00				
Carga bloqueo tolva		-1364,57			1027,92			0,00				
Peso cabina control	0,00	-20928,74	0,00	0,00	6071,83	0,00	0,00	-839,90	0,00			
GALERIA	1			2								
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Peso cinta alimentación		-257,26			-257,26							
Peso producto cinta alimentación		-128,63			-128,63							
Carga viento galería	88,27	24,97	88,27	88,27	-24,97	88,27						
Carga viento fuera servicio galería	180,14	50,95	180,14	180,14	-50,95	180,14						
Peso cabina control	268,41	-309,96	268,41	268,41	-461,80	268,41						
VIENTO	1			2			3					
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Carga viento 1	-13,67			0,00			0,00					
Carga viento 2			0,00			8,98					0,00	
Carga viento 3	0,00			0,00					13,67			
Carga viento fuera servicio 1	-27,89			0,00					0,00			
Carga viento fuera servicio 2			0,00			18,32					0,00	
Carga viento fuera servicio 3	0,00			0,00					27,89			
Peso cabina control	-41,56	0,00	0,00	0,00	0,00	27,30	41,56	0,00	0,00			
VIENTO PLUMA	1			2								
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Carga viento pluma 2			3789,08			-764,81						
Carga viento fuera servicio pluma 2			7732,81			-1560,83						
Peso cabina control	0,00	0,00	11521,89	0,00	0,00	-2325,63						

Tabla 12.25 - Cargas por zona consideradas sobre el cradle

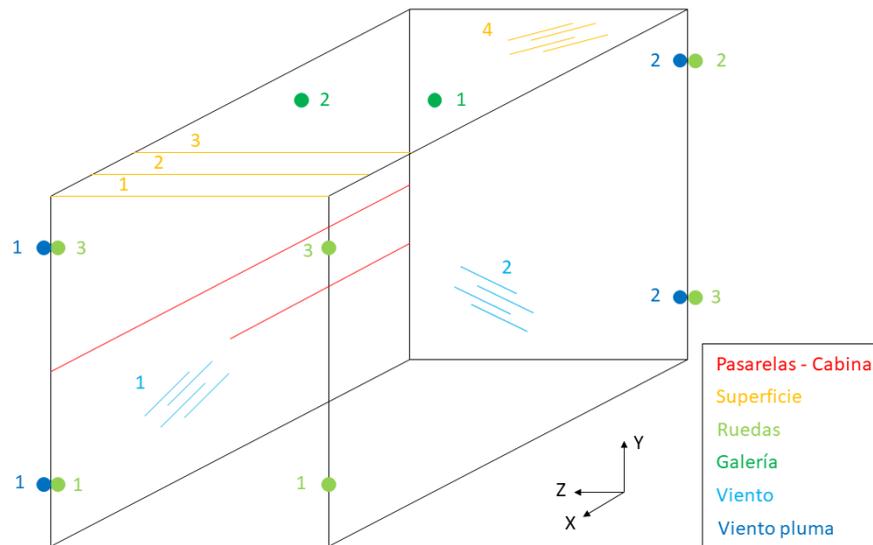


Figura 12.5 – Zonas de aplicación de cargas del cradle

En función del caso de carga estudiado, se mantendrán o eliminarán las cargas pertinentes incluidas en la tabla anterior.

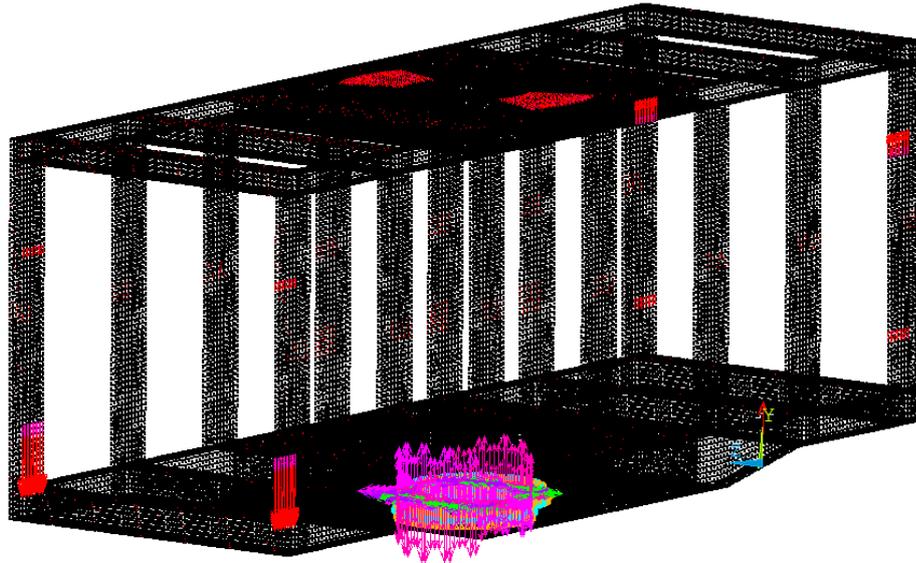
12.2.3.- Solución

Una vez llevado a cabo el preprocesamiento del modelo y el cálculo de las cargas por nudo, se pasará a la solución del modelo en cuestión, el cual queda resumido en los siguientes puntos:

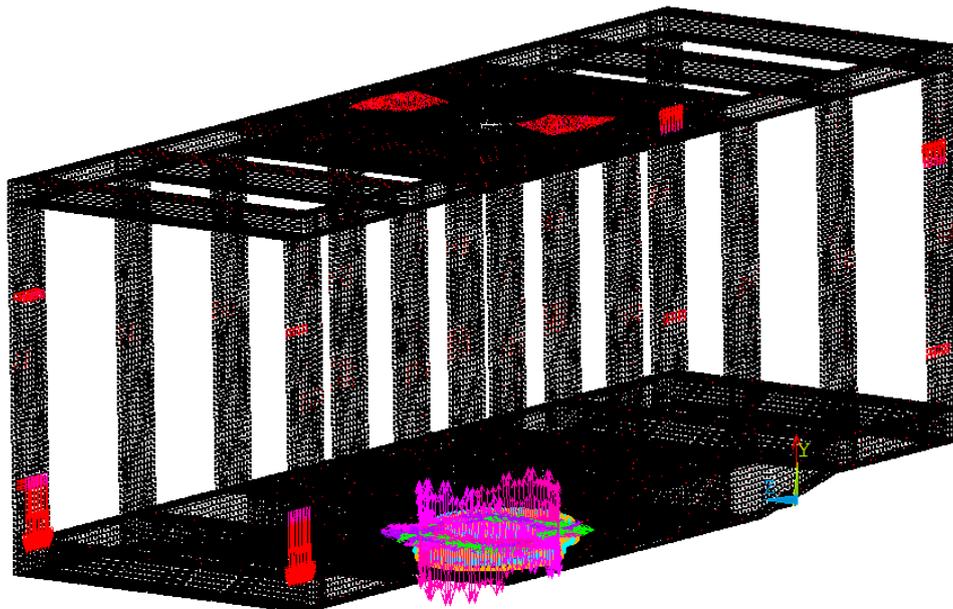
- **Definición de cargas.** Se definen cargas de tipo estructural, consistentes en desplazamientos y giros nulos en los nudos inferiores del anillo inferior del cradle, fuerzas en determinadas direcciones sobre los nudos pertinentes y una aceleración de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$.
- **Solución.** Se lleva a cabo el cálculo mediante el método de los elementos finitos sobre el modelo generado. En este caso, la resolución del problema será lineal.

Las imágenes inferiores muestran las cargas aplicadas sobre el modelo en cada uno de los casos de carga estudiados:

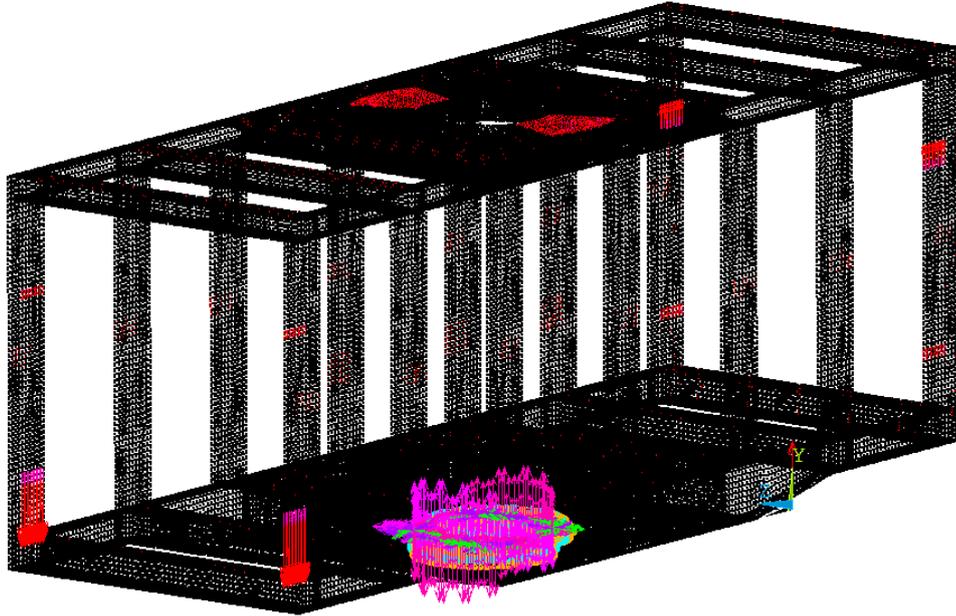
Caso VI



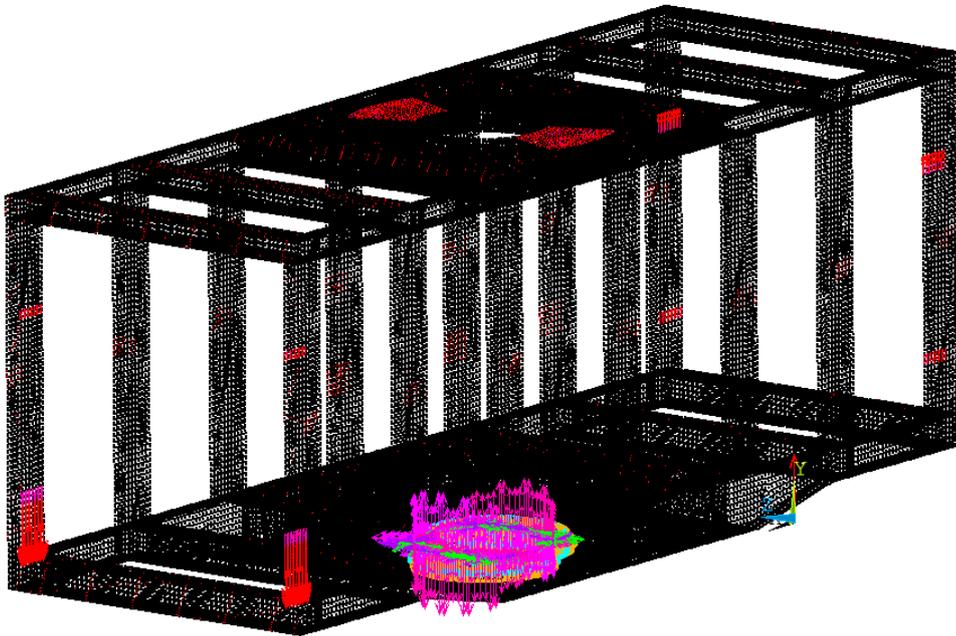
Caso VII



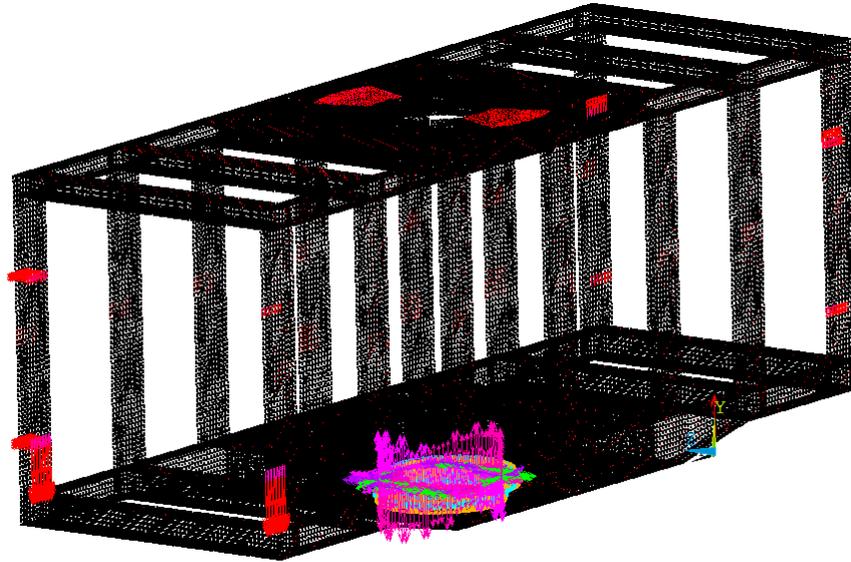
Caso VIII



Caso X



Caso XI



Caso XII

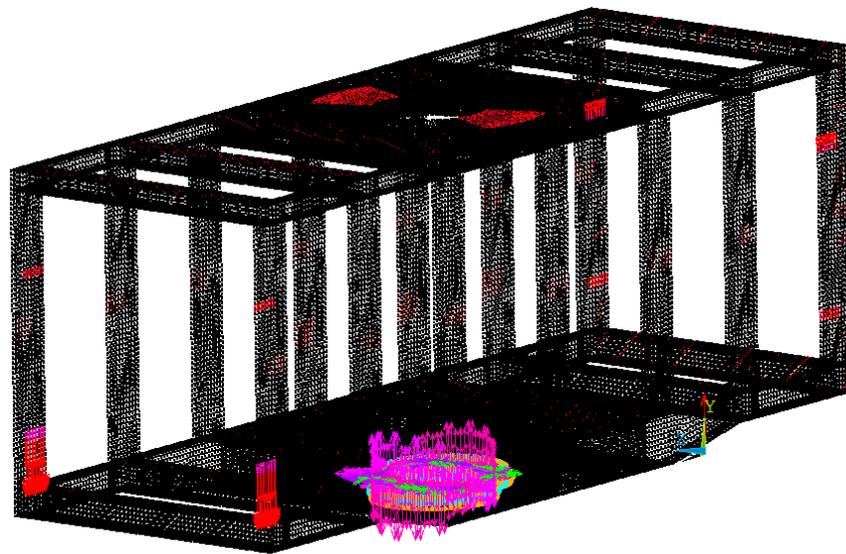


Tabla 12.26 - Cargas aplicadas sobre el modelo del cradle

Al igual que en Robot, se analizarán los casos de carga más desfavorables en los que los desplazamientos y las tensiones son máximos: cuando se produce el bloqueo de la tolva telescópica o cuando el cargador se encuentra fuera de servicio (además del resto de cargas, en ambos casos) con el viento incidiendo en distintas direcciones.

12.2.4.- Postprocesamiento del cálculo estático lineal

Una vez finalizada la resolución del modelo, se procederá con el postprocesamiento de los resultados, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. En este caso hay un solo conjunto de resultados, por lo que la lectura del primer conjunto será suficiente.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con la masa del modelo y los resultados de desplazamiento en cada nudo, comprobando que se encuentran dentro de los valores admisibles. En cuanto a los resultados de tensión, estos fueron filtrados para representar únicamente tensiones inferiores a los 200 MPa, ya que, tal y como se explica al final del presente apartado, se darán puntos con tensiones superiores a dicho valor, las cuales no son representativas del comportamiento real de la estructura.

Masa				
TOTAL MASS = 93248.				
Desplazamiento Caso VI				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	178354	152937	36805	153115
VALUE	27.179	-40.401	1.5273	48.489
Desplazamiento Caso VII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	177783	55779	161033	153567
VALUE	29.523	-43.097	21.957	55.394

Desplazamiento Caso VIII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	178354	152937	36805	153115
VALUE	27.735	-41.005	1.5387	49.288
Desplazamiento Caso X				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	178356	152937	36806	153115
VALUE	20.964	-32.023	1.2644	38.117
Desplazamiento Caso XI				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	177785	55773	161273	153556
VALUE	26.213	-37.707	45.232	62.679
Desplazamiento Caso XII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	178354	152937	36805	153115
VALUE	22.099	-33.254	1.2877	39.744

Tabla 12.27 – Masa y desplazamientos máximos del cradle

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los mapas de tensiones de Von Mises y desplazamientos del modelo.

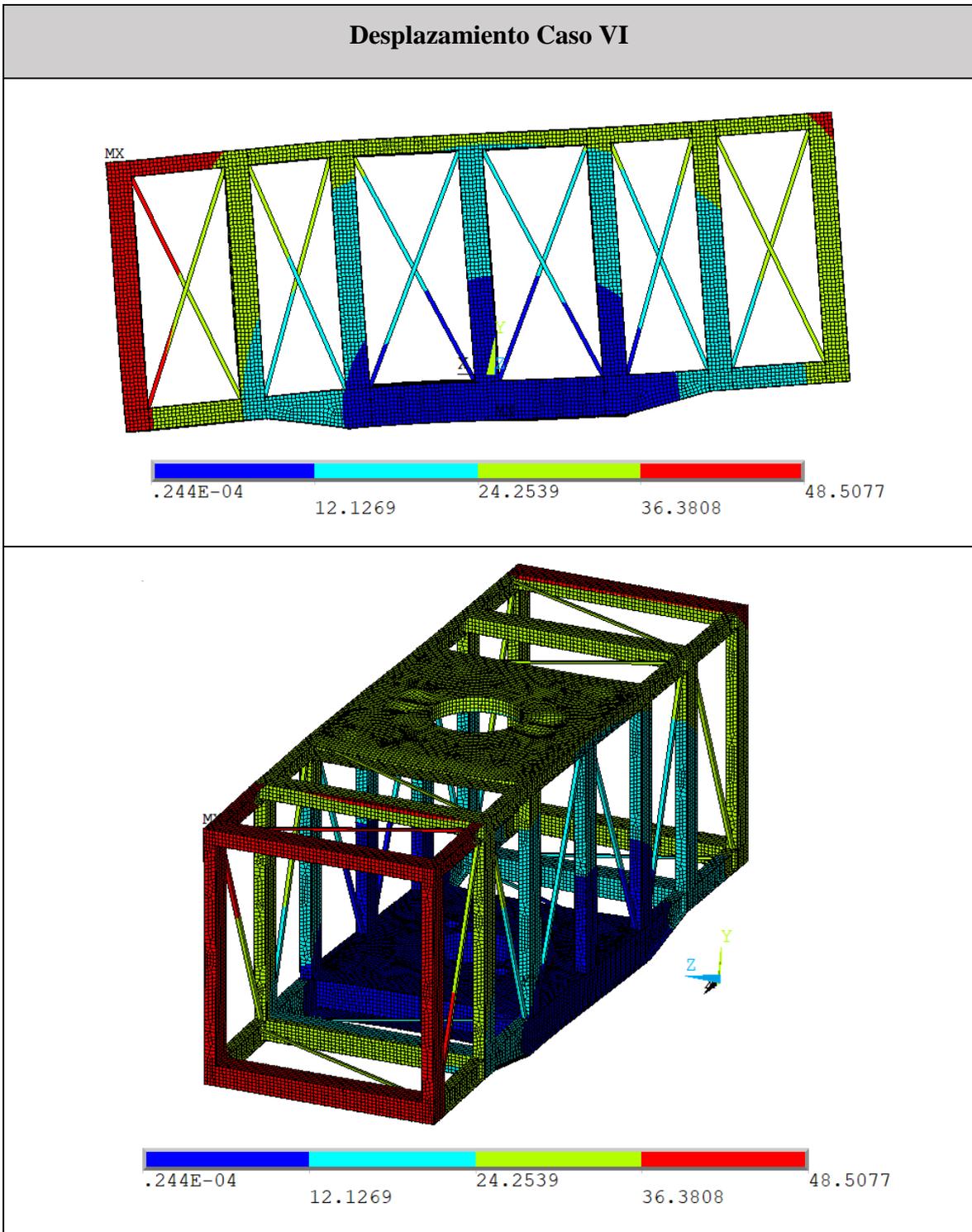


Tabla 12.28 - Desplazamiento del cradle (caso VI)

Tensión Caso VI

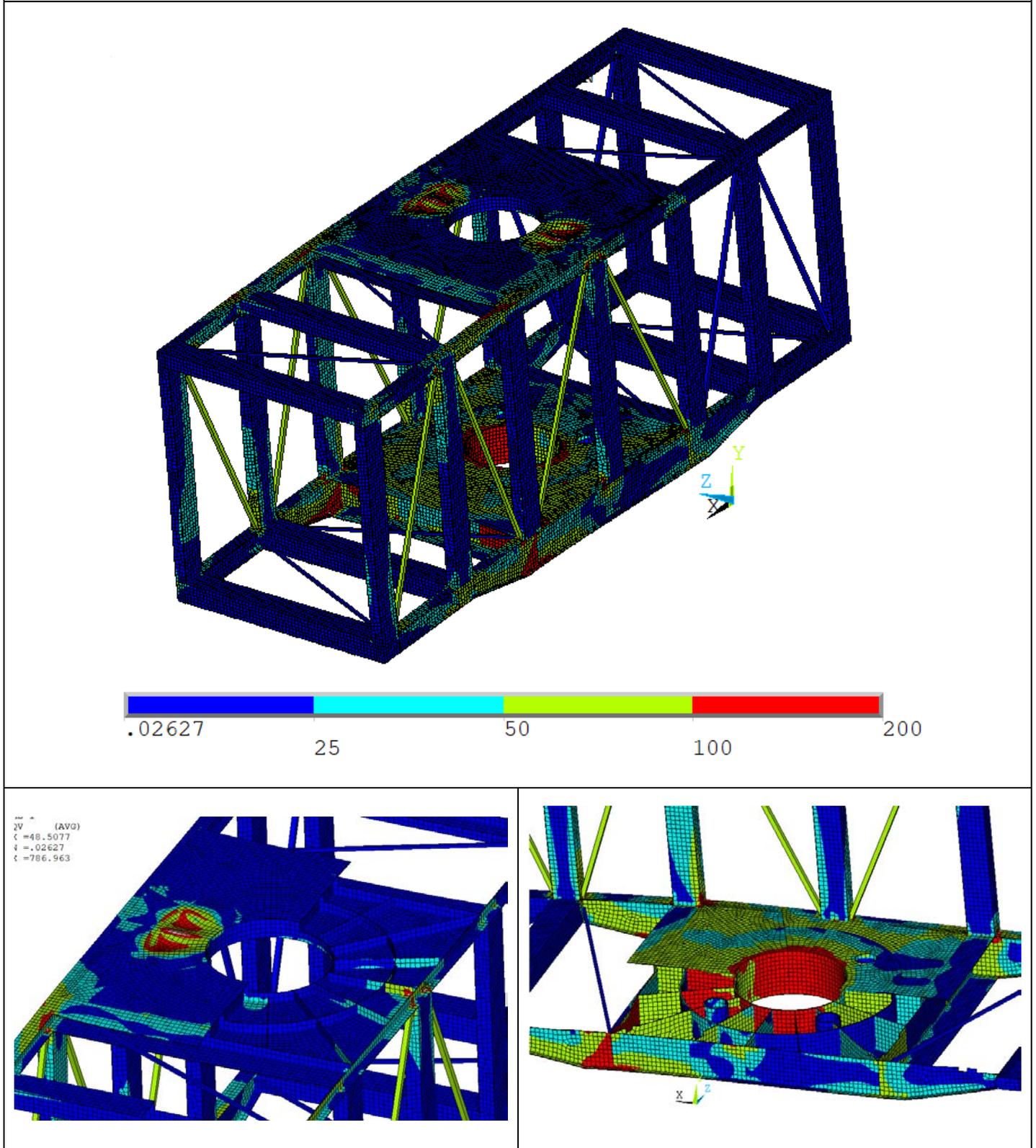


Tabla 12.29 - Tensión de Von Mises en el cradle (caso VI)

Desplazamiento Caso VII

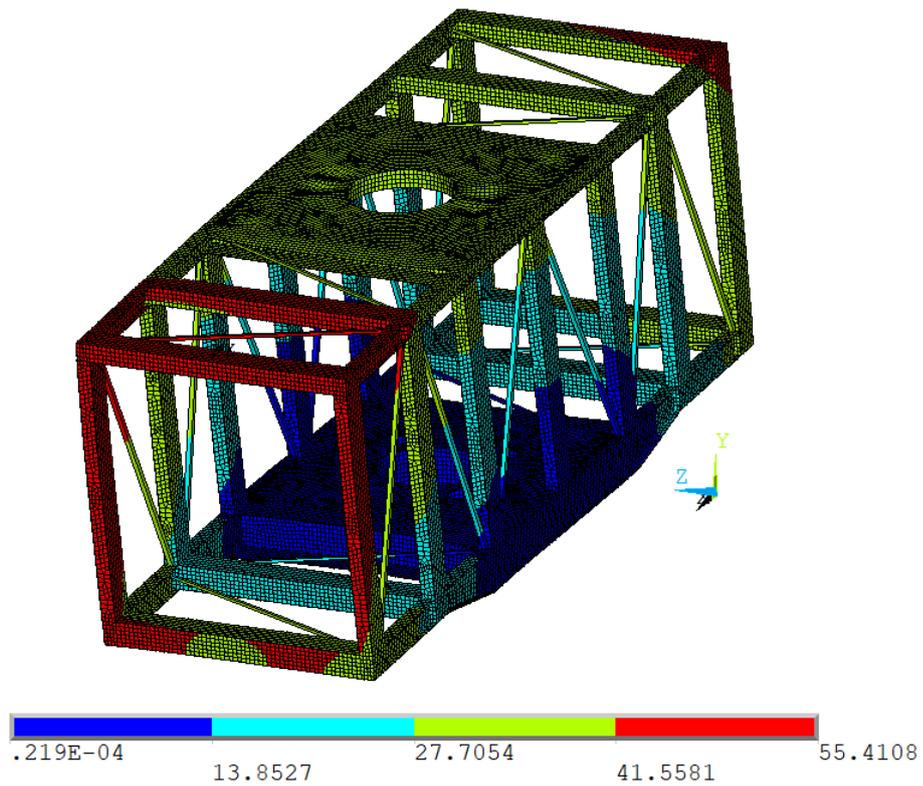
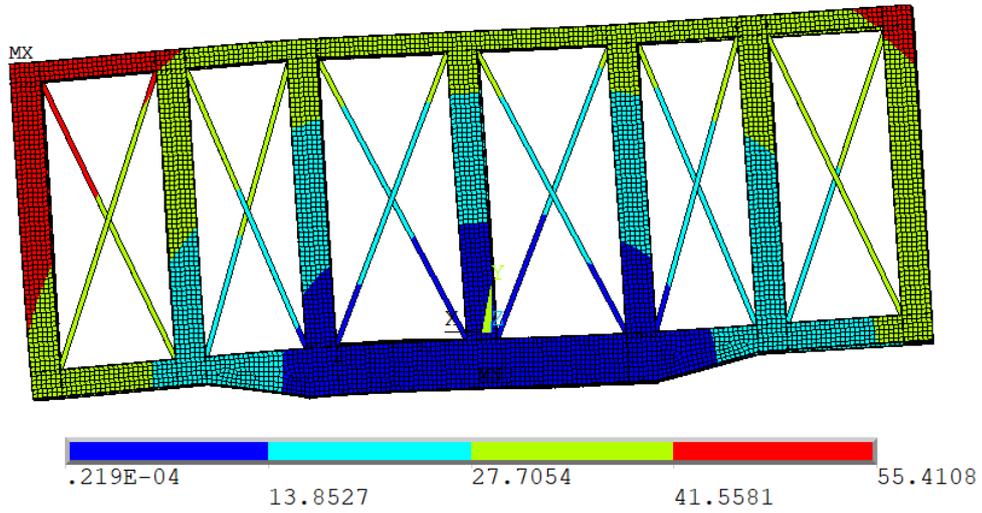


Tabla 12.30 - Desplazamiento del cradle (caso VII)

Tensión Caso VII

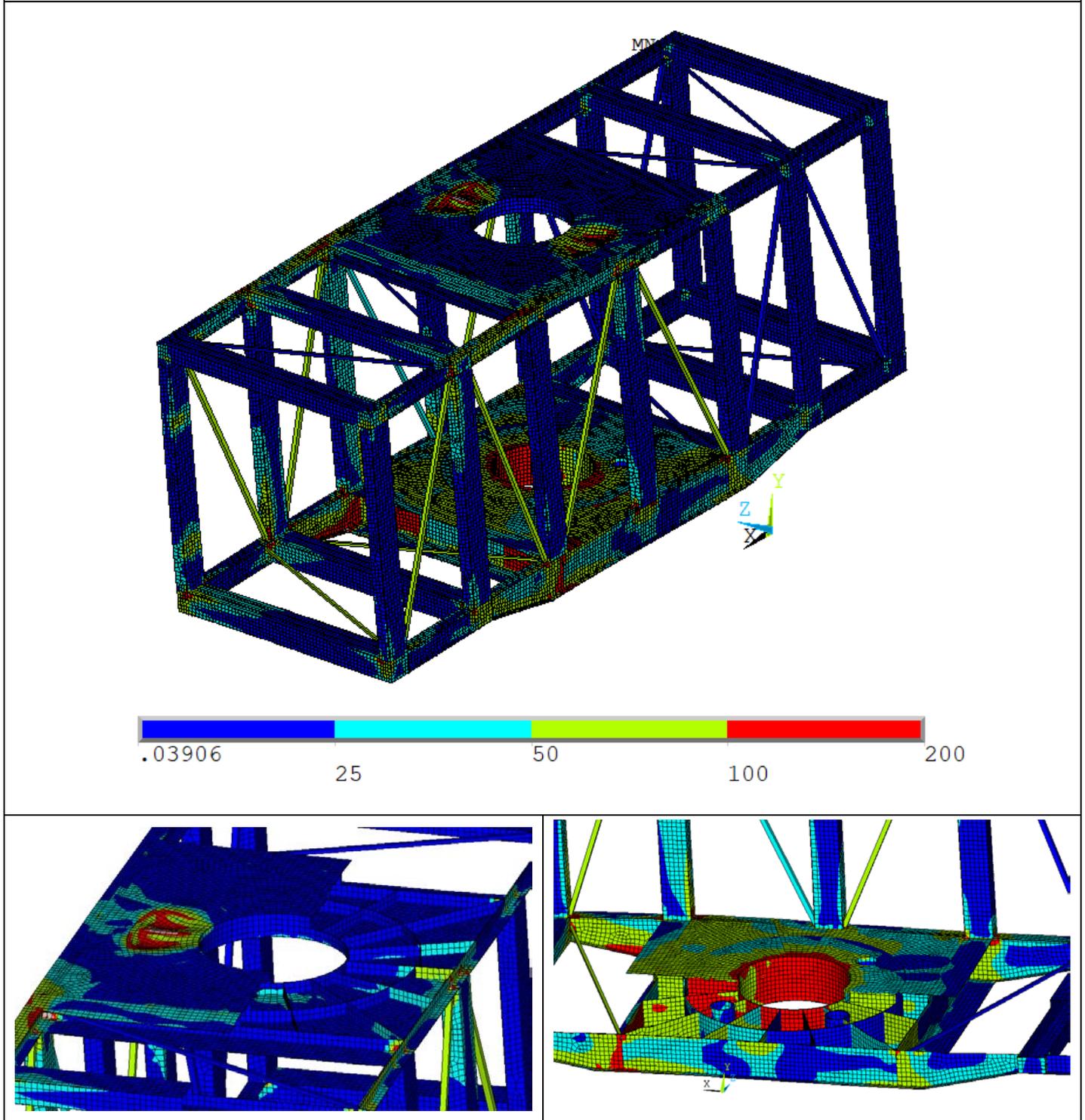


Tabla 12.31 - Tensión de Von Mises en el cradle (caso VII)

Desplazamiento Caso VIII

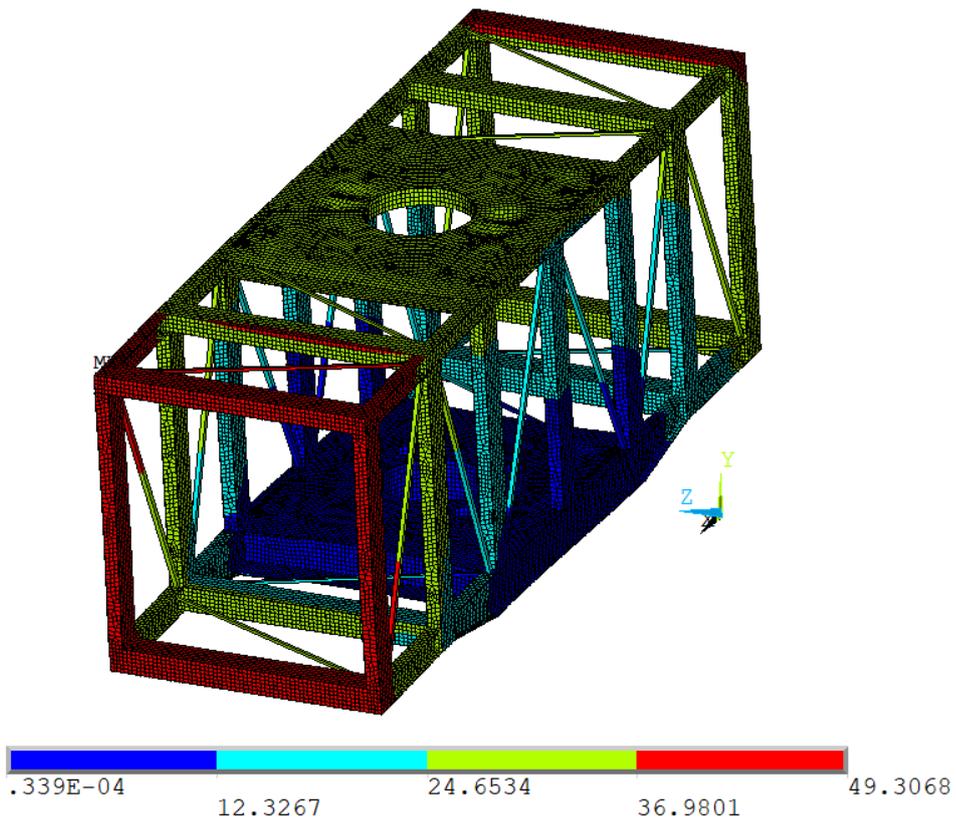
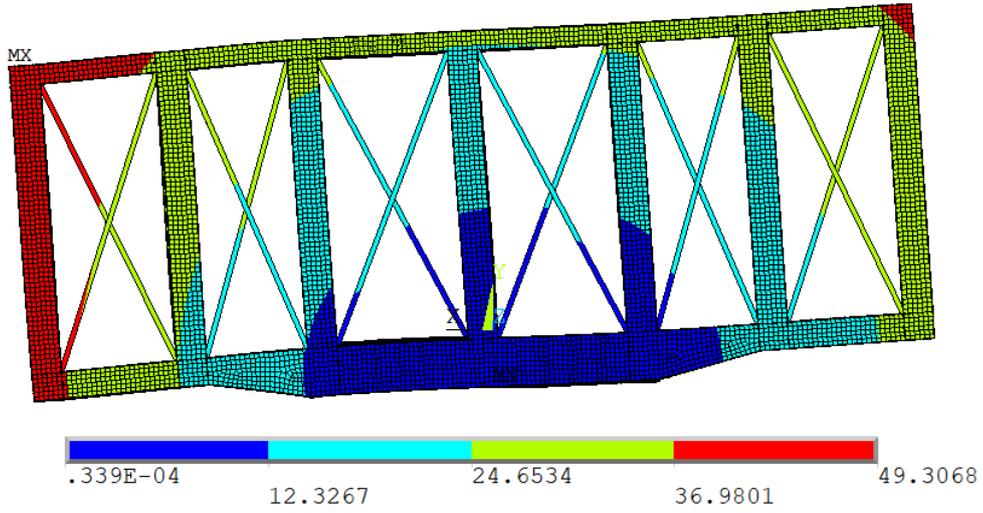


Tabla 12.32 - Desplazamiento del cradle (caso VIII)

Tensión Caso VIII

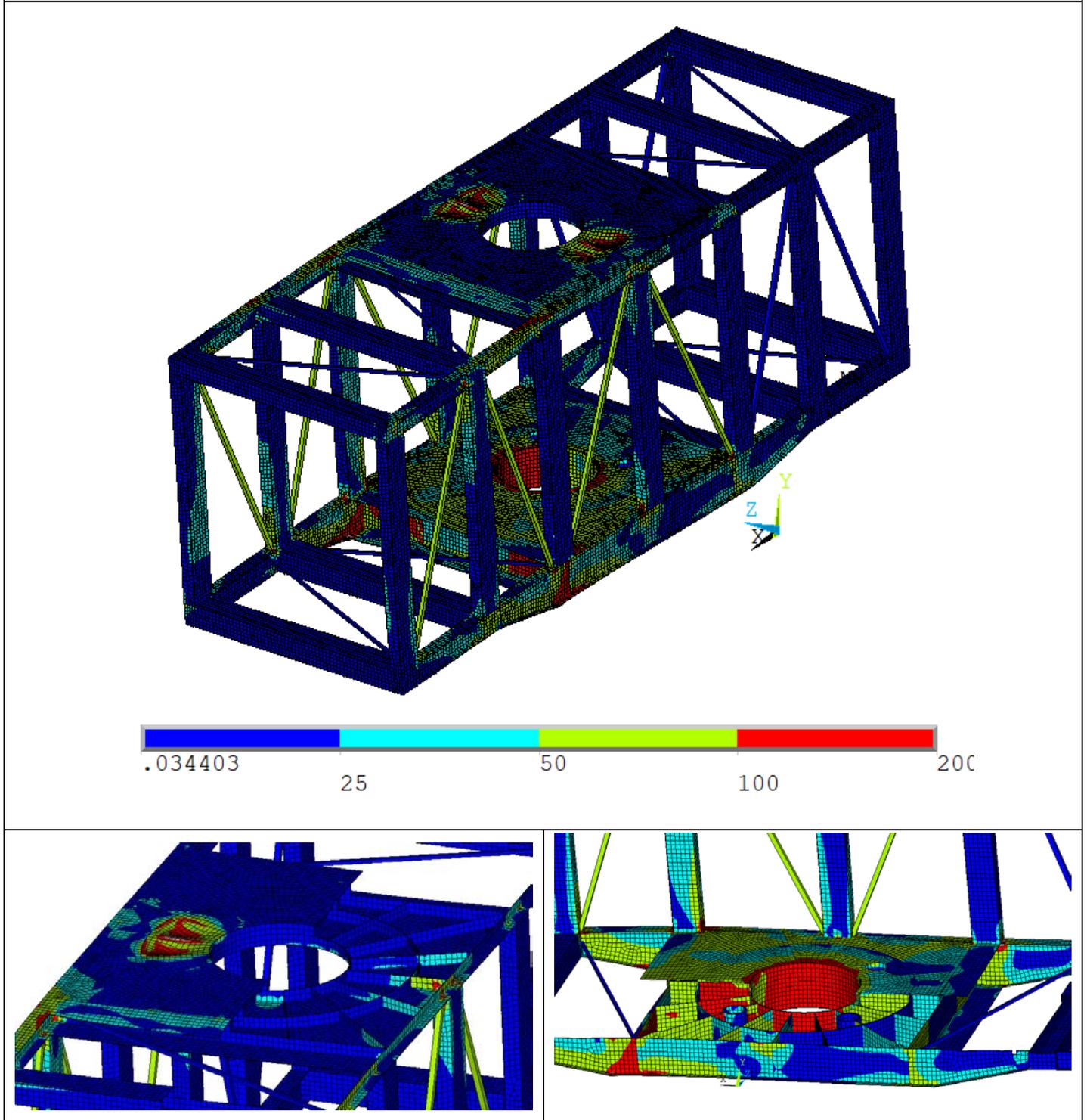


Tabla 12.33 - Tensión de Von Mises en el cradle (caso VIII)

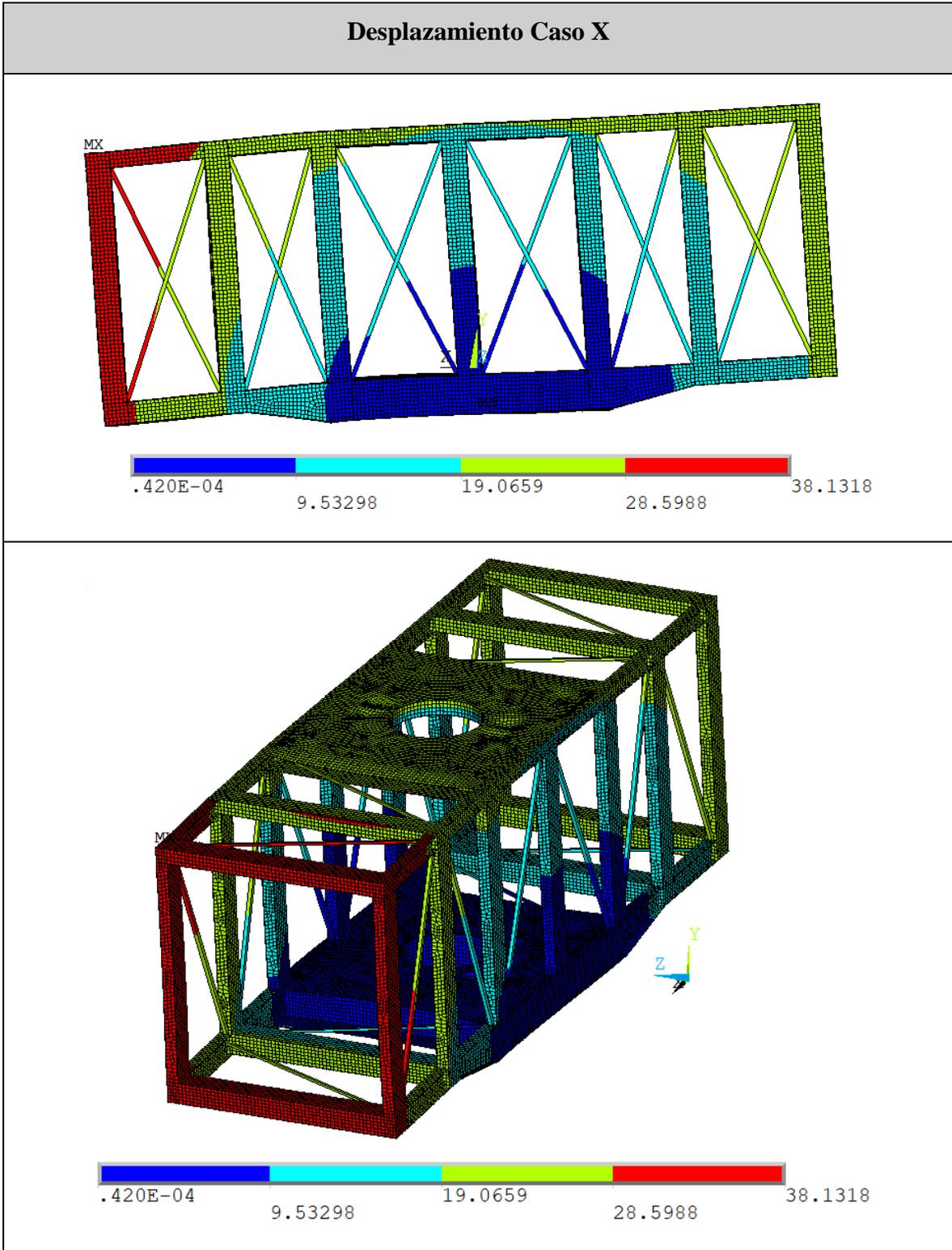


Tabla 12.34 - Desplazamiento del cradle (caso X)

Tensión Caso X

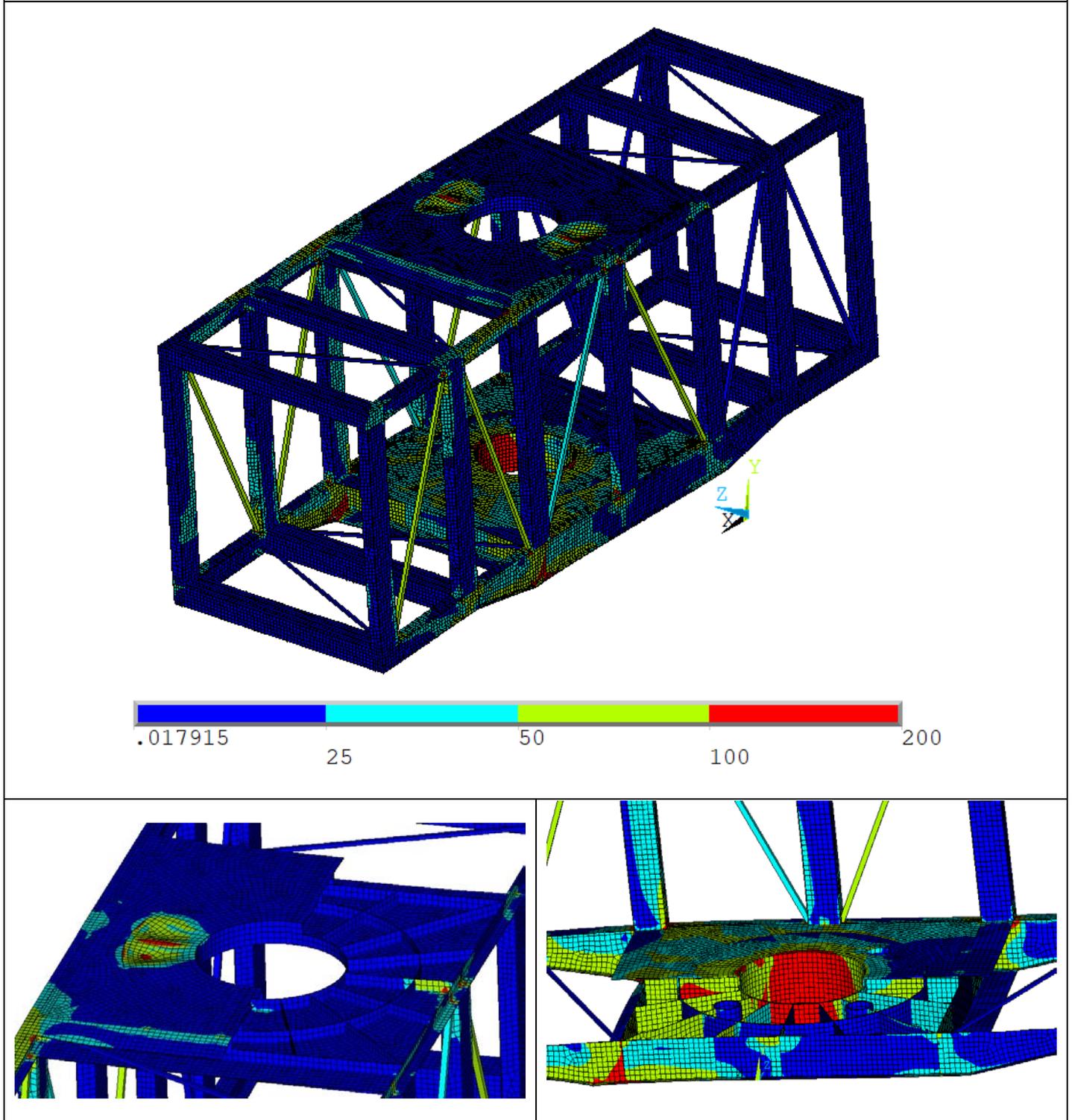


Tabla 12.35 – Tensión de Von Mises en el cradle (caso X)

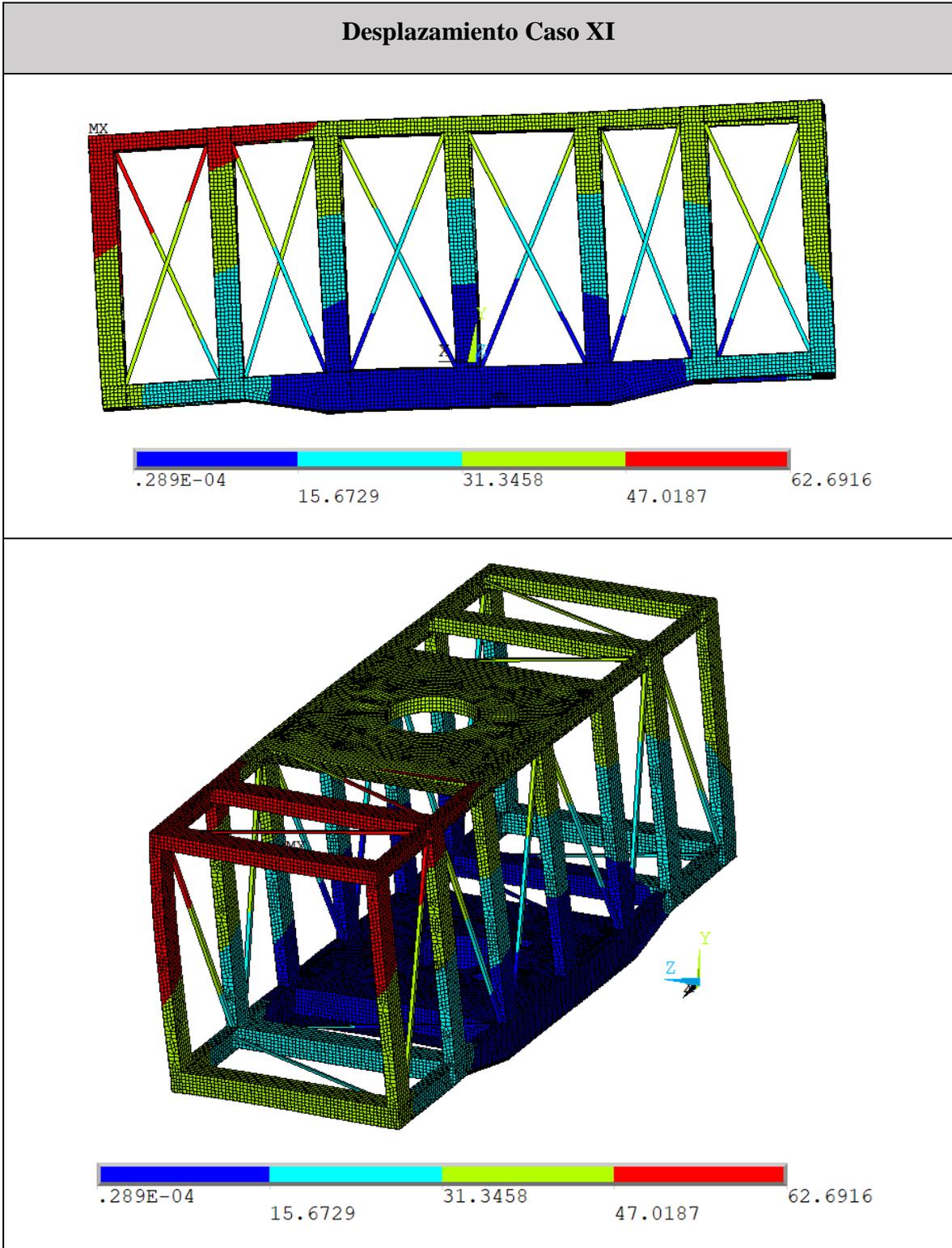


Tabla 12.36 - Desplazamiento del cradle (caso XI)

Tensión Caso XI

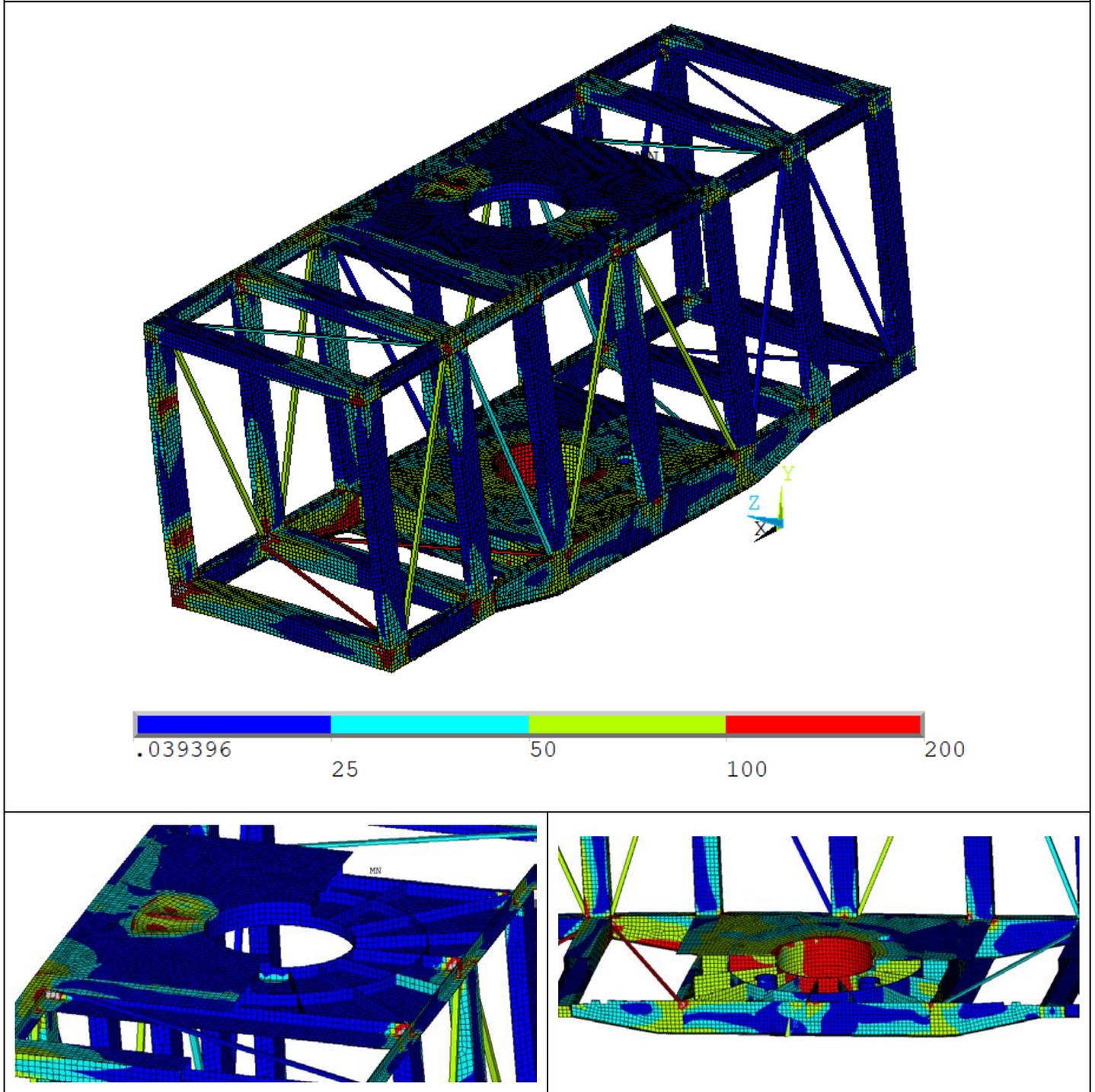


Tabla 12.37 - Tensión de Von Mises en el cradle (caso XI)

Desplazamiento Caso XII

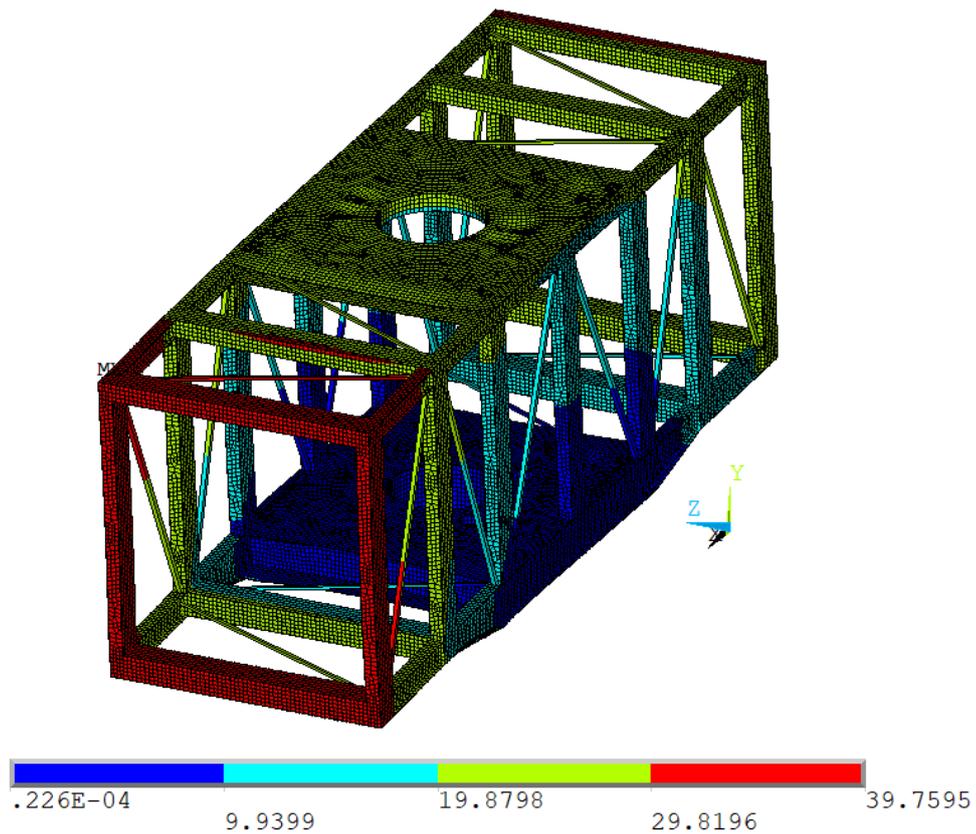
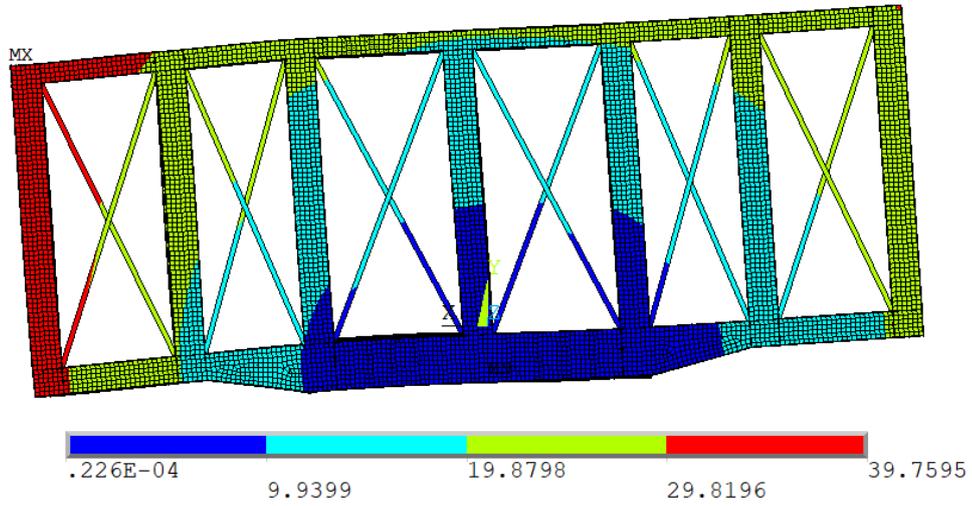


Tabla 12.38 - Desplazamiento del cradle (caso XII)

Tensión Caso XII

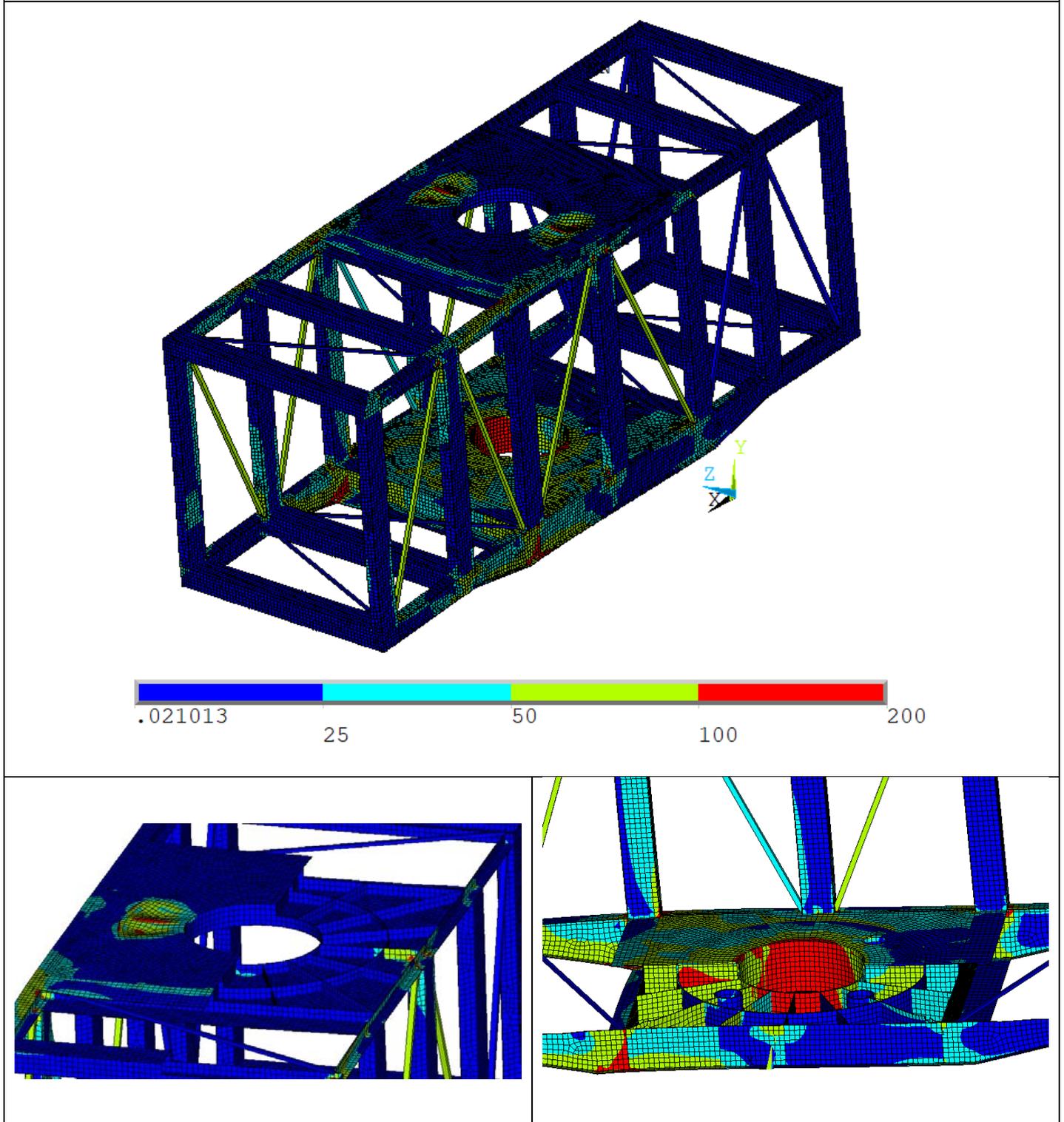


Tabla 12.39 - Tensión de Von Mises en el cradle (caso XII)

Como se puede observar, tras la optimización llevada a cabo en ANSYS, el peso estructural resulta ser unas 20 toneladas mayor al obtenido en el cálculo en Robot.

La máxima flecha se da en el Caso VI (cuando el telescópico está colmatado y el viento incide frontalmente, es decir, el designado como Viento 1 en apartados anteriores) y tiene un valor de 4,31 cm, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos:

$$\frac{4,31}{7,5 \cdot 10^2} = 0,0057 \cong \frac{1}{200} \quad (12.2)$$

Tal y como muestran los mapas de tensiones, estas son máximas en el Caso XI (cuando el cargador está fuera de servicio y el viento incide lateralmente, es decir, el designado como Viento fuera de servicio 2 en apartados anteriores) y tienen un valor máximo comprendido entre 100 y 200 MPa, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos. Únicamente se obtendrán tensiones superiores a 200 MPa en los puntos de unión entre determinadas barras, donde se produce una concentración de tensiones, tal y como muestra la siguiente figura:

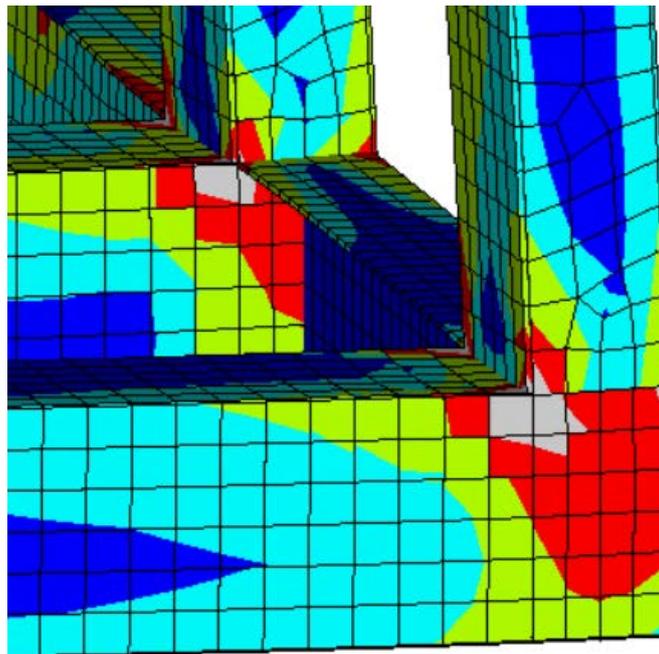


Figura 12.6 - Puntos de concentración de tensiones en el cradle

Estos resultados son admisibles, ya que las tensiones generadas en los puntos de unión de las distintas barras únicamente dan lugar a pequeñas deformaciones plásticas en zonas muy reducidas, las cuales no afectan a la integridad estructural. Además, en la realidad, las deformaciones y tensiones generadas son suavizadas mediante redondeos, cartelas y otros elementos de refuerzo.

12.2.5.- Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal

Una vez finalizado el cálculo estático lineal, se introducirán las operaciones del fichero de pandeo para llevar a cabo una comprobación a pandeo lineal, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. Cada uno de los modos de pandeo se corresponde con un conjunto de resultados distinto.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con los valores del coeficiente de pandeo para cada uno de los modos, comprobando que todos ellos sean superiores a tres (un coeficiente de pandeo superior a la unidad asegura que la estructura no sufrirá pandeo, sin embargo, de esta forma, se trabaja del lado de la seguridad).

Coeficiente de pandeo Caso VI					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.4482		1	1	1
2	-3.1219		1	2	2
3	3.4428		1	3	3
4	3.5255		1	4	4
5	3.7738		1	5	5
6	3.7883		1	6	6
7	3.8365		1	7	7
8	3.8981		1	8	8
9	3.9790		1	9	9
10	4.1435		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.5633		1	1	1
2	-3.2236		1	2	2
3	3.2747		1	3	3
4	3.3156		1	4	4
5	3.3535		1	5	5
6	3.5960		1	6	6
7	3.7408		1	7	7
8	3.8118		1	8	8
9	3.8304		1	9	9
10	3.9189		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VIII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.4355		1	1	1
2	-3.1098		1	2	2
3	3.4144		1	3	3
4	3.4958		1	4	4
5	3.7536		1	5	5
6	3.7550		1	6	6
7	3.8062		1	7	7
8	3.8800		1	8	8
9	3.9245		1	9	9
10	4.0898		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso X					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-4.9945		1	1	1
2	-4.1631		1	2	2
3	-3.7713		1	3	3
4	4.2348		1	4	4
5	4.3292		1	5	5
6	4.5636		1	6	6
7	4.6320		1	7	7
8	4.6665		1	8	8
9	4.6946		1	9	9
10	4.9898		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso XI					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-3.9007		1	1	1
2	-3.7093		1	2	2
3	-3.5304		1	3	3
4	-3.3208		1	4	4
5	3.2453		1	5	5
6	3.4060		1	6	6
7	3.4357		1	7	7
8	3.5054		1	8	8
9	3.7161		1	9	9
10	3.8189		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso XII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-4.8085		1	1	1
2	-4.1256		1	2	2
3	-3.7356		1	3	3
4	4.1476		1	4	4
5	4.2411		1	5	5
6	4.5067		1	6	6
7	4.5278		1	7	7
8	4.5763		1	8	8
9	4.6400		1	9	9
10	4.8187		1	10	10

Tabla 12.40 – Coeficientes de pandeo del cradle

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los modos de pandeo más desfavorables.

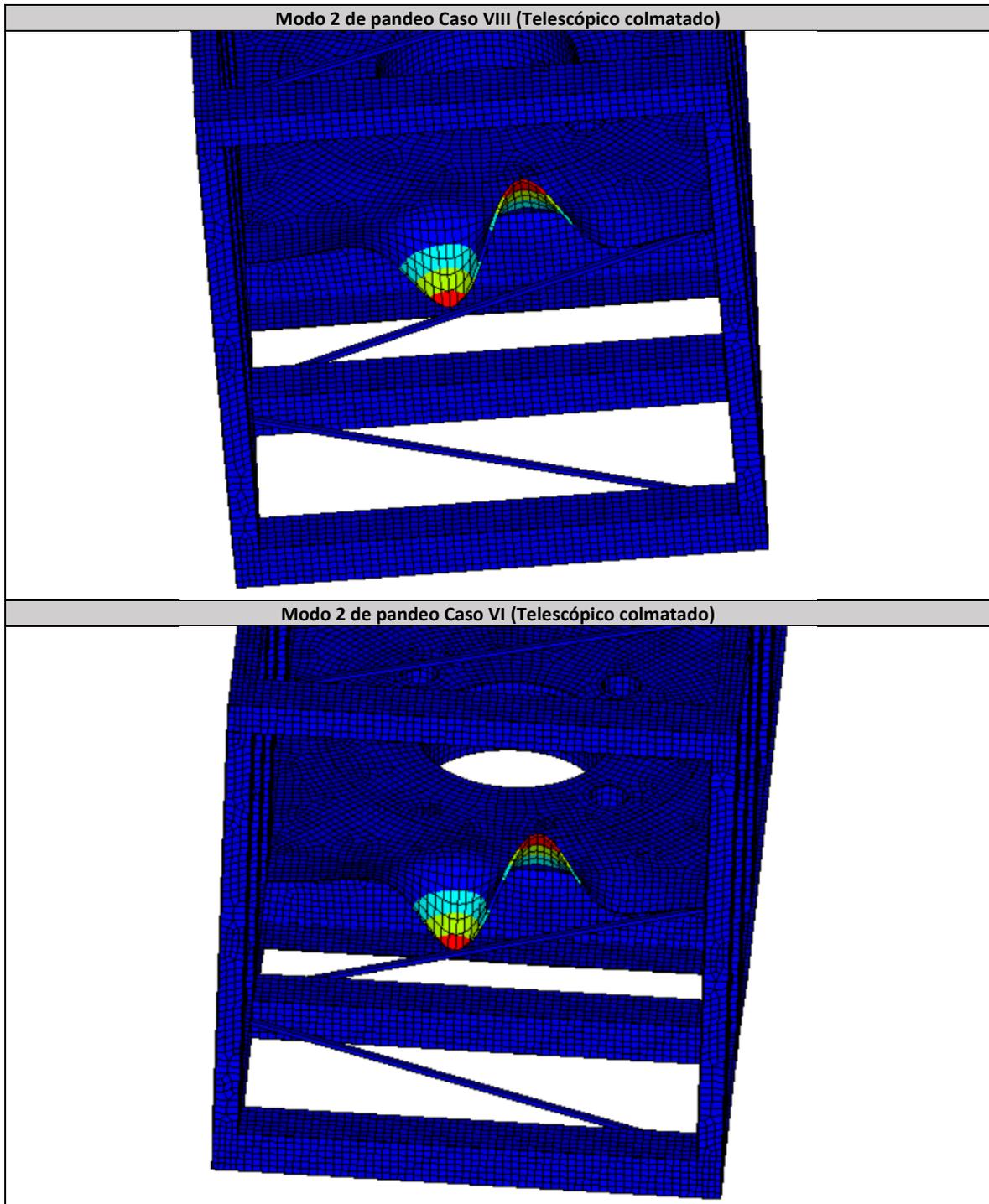


Tabla 12.41 - Modos de pandeo más desfavorables de la base y la torre

Contrariamente a lo observado en la pluma, al igual que ocurría en el modelo alámbrico, cada modo de pandeo produciría un fallo en un punto distinto del cradle, sin seguir un patrón común. Por ello, en caso de producirse pandeo, la localización del fallo dependería de las condiciones de carga concretas.

12.3.- ANÁLISIS DE LA BASE Y LA TORRE

En tercer lugar, se analizará el modelo generado para la base y la torre. El presente apartado incluye una descripción del procesamiento y resultados obtenidos a partir de dicho modelo.

12.3.1.- Preprocesamiento

Una vez importado al espacio de trabajo el archivo IGES generado previamente, se llevará a cabo un preprocesamiento del modelo. A continuación, se incluye una descripción de dicho proceso:

- **Tipo de elemento.** Se emplean elementos del tipo BEAM189 para todas las vigas que conforman la geometría de la base y la torre y elementos del tipo LINK180 para el arriostamiento de la torre.
- **Propiedades del material.** Se definen las propiedades del acero a través de una densidad de $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, un módulo de Young de $21 \cdot 10^4$ MPa y un coeficiente de Poisson de 0,30.
- **Secciones.** Se definen las distintas secciones a asignar a cada viga (elementos tipo BEAM) y a cada arriostamiento (elementos tipo LINK).

SECCIONES	
Base	RECT 600X1500X20
Pilares	TCAR 300X10
Arriostramiento	TCAR 250X8

Tabla 12.42 - Secciones empleadas en el modelo de la base y la torre

Como se puede observar, se mantuvo la nomenclatura empleada durante el modelado alámbrico.

Los elementos tipo LINK no se definen a través de sus dimensiones, sino que hay que especificar lo siguiente:

Arriostramiento	Área 7744 mm ² 0,059 kg/mm
-----------------	--

Tabla 12.43 - Propiedades elementos tipo LINK de la base y la torre

- **Modelado.** Se lleva a cabo una operación booleana de superposición para definir correctamente la intersección y unión de las distintas líneas.
Se crean los elementos del tipo LINK que definirán el arriostramiento de la torre (los elementos del tipo LINK se definen entre nudos, por lo que serán creados posteriormente al mallado del modelo).
- **Mallado.** Se define un tamaño máximo de elemento de 100 mm y se lleva a cabo el mallado de todos los elementos, dando lugar a la nube de nudos resultante.

Las siguientes imágenes muestran la evolución del modelo de la base y la torre a lo largo de la etapa de preprocesamiento:

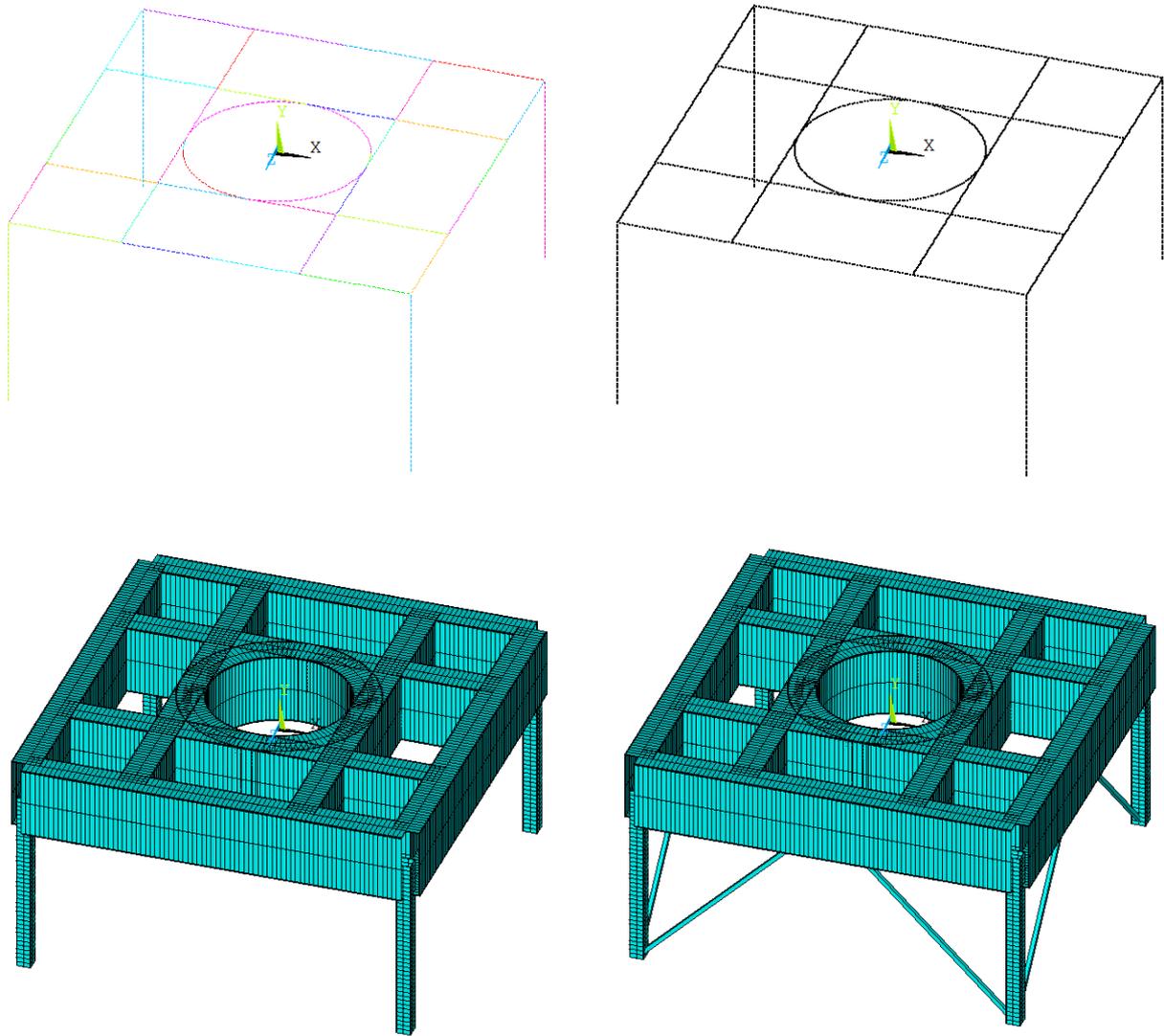


Figura 12.7 – Preprocesamiento del modelo de la base y la torre

12.3.2.- Cargas por nudo

En este caso, al tratarse de un modelo tridimensional, la distribución de cargas se realizará sobre conjuntos de nudos en lugar de sobre nudos aislados y barras como ocurría en el modelo alámbrico. Para ello, se seleccionarán las líneas pertinentes, se seleccionarán los nudos contenidos en dichas líneas y, finalmente, se aplicarán las cargas sobre los nudos.

De forma paralela a lo realizado en el modelo alámbrico, es posible calcular las cargas por elemento a partir del número de nudos seleccionados en cada caso. La tabla inferior recoge las distintas cargas por nudo a tener en cuenta sobre la base y la torre:

CARGAS POR NUDO BASE Y TORRE	
Pluma 45 °	
Peso base y torre	auto KN/m
Peso pasarelas (372 nudos)	51,95 kN
Peso accionamiento rotación (228 nudos)	1161,71 kN
Peso acumulación suciedad (372 nudos)	0,81 kN
Carga viento (569 nudos)	95,56 kN
Carga nieve (1372 nudos)	22,88 kN
Sobrecarga (372 nudos)	421,94 kN
Carga viento fuera servicio (569 nudos)	195,02 kN
Viento	
q (35 m/s)	750,93 N/m ²
F	54372,78 N
Viento fuera servicio	
q (50 m/s)	1532,50 N/m ²
F	110964,85 N

Tabla 12.44 - Cargas por nudo consideradas sobre la base y la torre

Para llevar a cabo el proceso seguido en el modelo alámbrico (definir los esfuerzos producidos por la pluma y el cradle sobre la base y la torre a partir de un modelo completo del cargador) sería necesario trabajar con los denominados *Superelementos*, lo cual complicaría en exceso la definición del modelo y elevaría considerablemente el tiempo de cálculo del programa. Por ello, en este caso, se optará por la modelización de los esfuerzos producidos por la pluma y el cradle en la base y la torre. Dichos esfuerzos se modelarán como una carga vertical y un momento en una determinada dirección, tal y como recoge la tabla inferior:

Cargas	Valor		Distancia		Momento de vuelco		Momento torsor	
Prin_Peso_Pluma	680722,15	N	14,56	m	9911846,54	N m		
Prin_Producto_Pluma	70332,97	N	35,72	m	2512031,64	N m		
Ad_Viento1_Pluma	21025,90	N	4,50	m	94616,55	N m		
Ad_Viento2_Pluma	220771,95	N	4,50	m	993473,78	N m	2991901,47	N m
Ad_Otros_Pluma	374006,25	N	13,55	m	5068532,70	N m		
Esp_Bloqueo_Pluma	41322,76	N	38,55	m	1593075,18	N m		
Esp_VientoFuera1_Pluma	42910,00	N	4,50	m	193095,00	N m		
Esp_VientoFuera2_Pluma	450555,00	N	4,50	m	2027497,50	N m	6105921,36	N m
Prin_Peso_Cradle	1366638,89	N	0,20	m	279585,00	N m		
Prin_Producto_Cradle	147150,00	N	0,00	m	0,00	N m		
Ad_Viento1_Cradle	48299,50	N	4,50	m	217347,73	N m		
Ad_Viento2_Cradle	144898,49	N	4,50	m	652043,20	N m		
Ad_Viento1_Galería	-	N	10,00	m	-	N m		
Ad_Viento2_Galería	142808,61	N	10,00	m	1428086,11	N m		
Ad_Otros_Cradle	141264,00	N	0,00	m	0,00	N m		
Esp_VientoFuera1_Cradle	98570,40	N	4,50	m	443566,80	N m		
Esp_VientoFuera2_Cradle	295711,20	N	4,50	m	1330700,40	N m		
Esp_VientoFuera1_Galería	-	N	10,00	m	-	N m		
Esp_VientoFuera2_Galería	291446,15	N	10,00	m	2914461,46	N m		
Agrupación de cargas	Valor		Fuerza por nudo (228 nudos)		Momento de vuelco		Fuerza por nudo (118 nudos)	
Prin_Peso	2047361,04	N	8979,65	N	10191431,54	N m	47982,26	N
Prin_Producto	217482,97	N	953,87	N	2512031,64	N m	11826,89	N
Ad_Viento1	69325,40	N	304,06	N	311964,28	N m	1468,76	N
Ad_Viento2	508479,05	N	2230,17	N	3073603,09	N m	14470,82	N
Ad_Otros	515270,25	N	2259,96	N	5068532,70	N m	23863,15	N
Esp_Bloqueo	41322,76	N	181,24	N	1593075,18	N m	7500,35	N
Esp_VientoFuera1	141480,40	N	620,53	N	636661,80	N m	2997,47	N
Esp_VientoFuera2	1037712,35	N	4551,37	N	6272659,36	N m	29532,29	N
Momentos torsores	Fuerza por nudo (118 nudos)							
Torsor Viento Pluma 2	14086,17	N						
Torsor Viento Fuera Pluma 2	28747,28	N						

Tabla 12.45 - Cargas de la pluma y del cradle consideradas sobre la base y la torre

En ANSYS APDL, al aplicar una carga sobre un nudo en una determinada dirección, se eliminan las cargas definidas previamente en dicha dirección. Por ello, será de vital importancia agrupar las cargas a aplicar en cada zona del modelo para evitar este problema. A continuación, se incluye una tabla con las cargas por nudo a aplicar en cada zona, así como una representación esquemática de la estructura para facilitar la interpretación de dichas zonas:

ANILLO	1			2			3			4		
	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ	FX	FY	FZ
Peso accionamiento rotación		-1161,71			-1161,71			-1161,71			-1161,71	
Prin_Peso		-8979,65			-8979,65			-8979,65			-8979,65	
Prin_Producto		-47982,26			47982,26			0,00			0,00	
Ad_Viento1	215,00		-215,00	215,00		-215,00	215,00		-215,00	215,00		-215,00
Ad_Viento2		1468,76			-1468,76			0,00			0,00	
Ad_Viento3	-1576,97		-1576,97	-1576,97		-1576,97	-1576,97		-1576,97	-1576,97		-1576,97
Ad_Otros		0,00			0,00			14470,82			-14470,82	
Esp_Bloqueo	-215,00		215,00	-215,00		215,00	-215,00		215,00	-215,00		215,00
Esp_vientoFuera1		-1468,76			1468,76			0,00			0,00	
Esp_vientoFuera2		-2259,96			-2259,96			-2259,96			-2259,96	
Esp_vientoFuera3		-23863,15			23863,15			0,00			0,00	
Torsor Viento Pluma 2		-181,24			-181,24			-181,24			-181,24	
Torsor Viento Fuera Pluma 2		-7500,35			7500,35			0,00			0,00	
Esp_vientoFuera1	438,78		-438,78	438,78		-438,78	438,78		-438,78	438,78		-438,78
Esp_vientoFuera2		2997,47			-2997,47			0,00			0,00	
Esp_vientoFuera3	-3218,30		-3218,30	-3218,30		-3218,30	-3218,30		-3218,30	-3218,30		-3218,30
Torsor Viento Pluma 2		0,00			0,00			29532,29			-29532,29	
Torsor Viento Fuera Pluma 2	-438,78		438,78	-438,78		438,78	-438,78		438,78	-438,78		438,78
Torsor Viento Fuera Pluma 2		-2997,47			2997,47			0,00			0,00	
Torsor Viento Pluma 2	-9960,42		-9960,42	9960,42		9960,42	0,00		0,00	0,00		0,00
Torsor Viento Fuera Pluma 2	-20327,39		-20327,39	20327,39		20327,39	0,00		0,00	0,00		0,00
	-35083,09	-104709,09	-35083,09	25492,54	77636,22	25492,54	-4795,27	30466,68	-4795,27	-4795,27	-57539,55	-4795,27
BASE	FX	FY	FZ									
Peso pasarelas		-51,95										
Peso acumulación suciedad		-0,81										
Carga nieve		-22,88										
Sobrecarga		-421,94										
	0,00	-497,58	0,00									
TORRE												
Carga viento 1	67,57		-67,57	67,57		-67,57	0,00		0,00	0,00		0,00
Carga viento 2	0,00		0,00	-67,57		-67,57	-67,57		-67,57	0,00		0,00
Carga viento 3	0,00		0,00	0,00		0,00	-67,57		67,57	-67,57		67,57
Carga viento fuera servicio 1	137,90		-137,90	137,90		-137,90	0,00		0,00	0,00		0,00
Carga viento fuera servicio 2	0,00		0,00	-137,90		-137,90	-137,90		-137,90	0,00		0,00
Carga viento fuera servicio 3	0,00		0,00	0,00		0,00	-137,90		137,90	-137,90		137,90
	205,47	0,00	-205,47	0,00	0,00	-410,94	-410,94	0,00	0,00	-205,47	0,00	205,47

Tabla 12.46 - Cargas por zona consideradas sobre la base y la torre

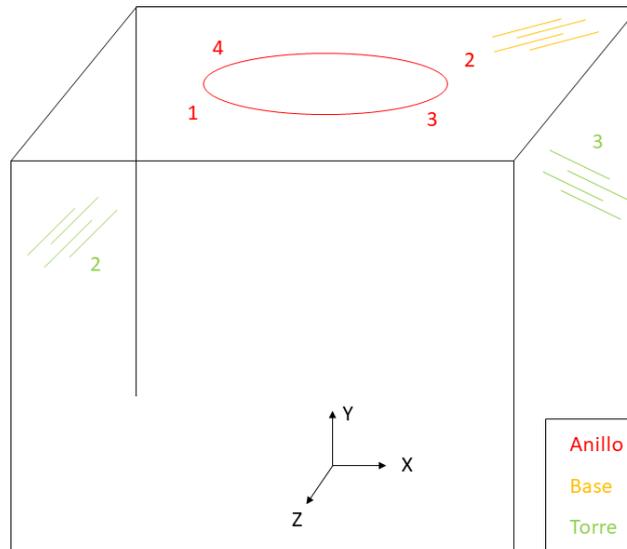


Figura 12.8 – Zonas de aplicación de cargas de la base y la torre

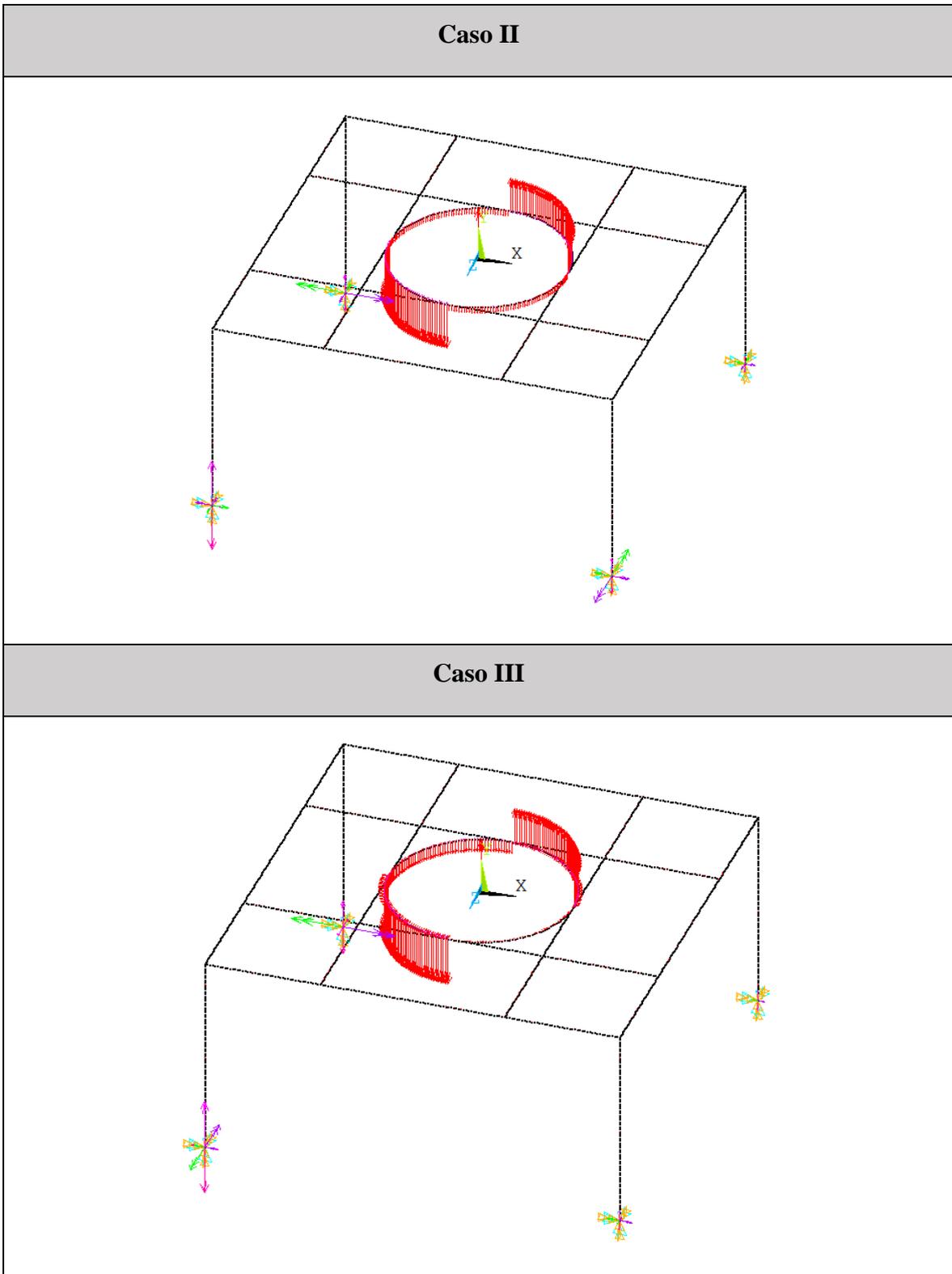
En función del caso de carga estudiado, se mantendrán o eliminarán las cargas pertinentes incluidas en la tabla anterior.

12.3.3.- Solución

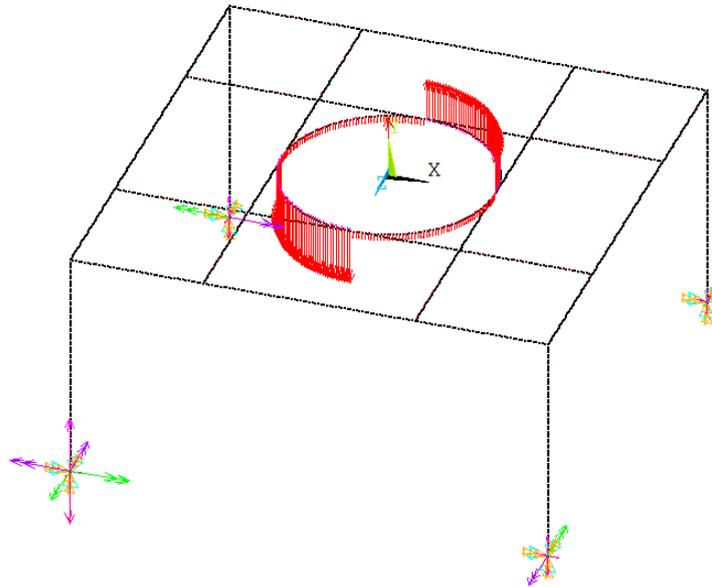
Una vez llevado a cabo el preprocesamiento del modelo y el cálculo de las cargas por nudo, se pasará a la solución del modelo en cuestión, el cual queda resumido en los siguientes puntos:

- **Definición de cargas.** Se definen cargas de tipo estructural, consistentes en desplazamientos y giros nulos en los nudos inferiores de los pilares de la torre, fuerzas en determinadas direcciones sobre los nudos pertinentes y una aceleración de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$.
- **Solución.** Se lleva a cabo el cálculo mediante el método de los elementos finitos sobre el modelo generado. En este caso, la resolución del problema será lineal.

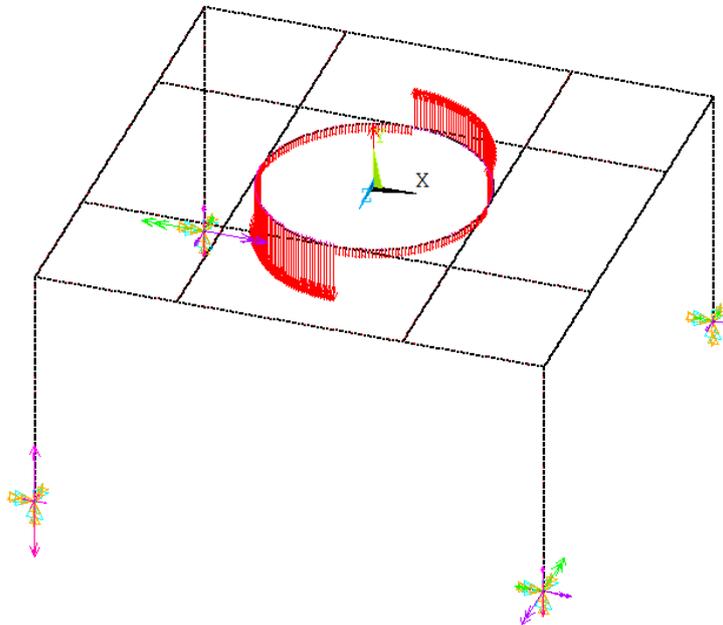
Las imágenes inferiores muestran las cargas aplicadas sobre el modelo en cada uno de los casos de carga estudiados:



Caso IV



Caso VI



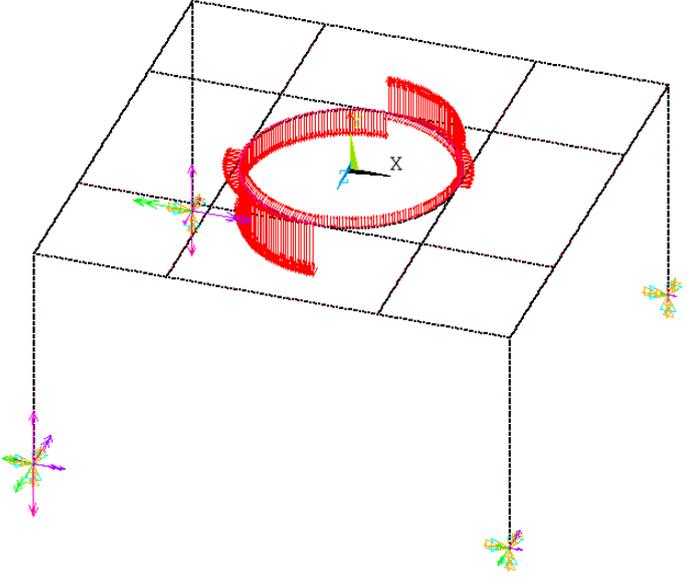
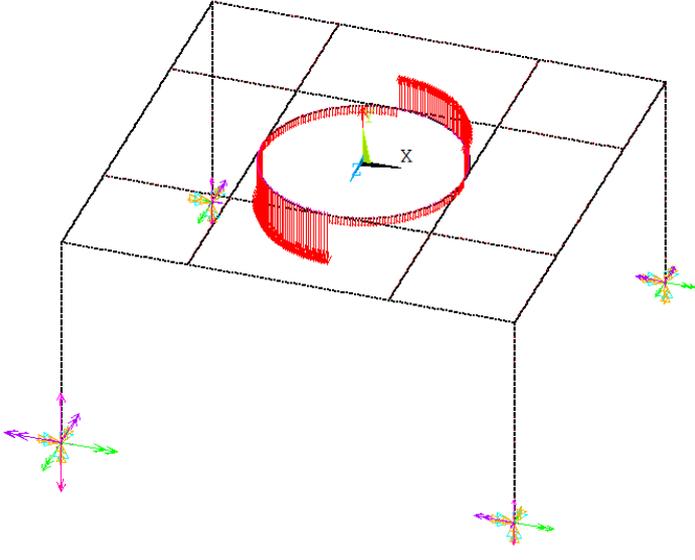
Caso VII

Caso VIII


Tabla 12.47 - Cargas aplicadas sobre el modelo de la base y la torre

Al igual que en Robot, se analizarán los casos de carga más desfavorables en los que los desplazamientos y las tensiones son máximos: cuando se produce el bloqueo de la tolva telescópica o cuando el cargador se encuentra fuera de servicio (además del resto de cargas, en ambos casos) con el viento incidiendo en distintas direcciones.

12.3.4.- Postprocesamiento del cálculo estático lineal

Una vez finalizada la resolución del modelo, se procederá con el postprocesamiento de los resultados, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. En este caso hay un solo conjunto de resultados, por lo que la lectura del primer conjunto será suficiente.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con la masa del modelo y los resultados de desplazamiento en cada nudo, comprobando que se encuentran dentro de los valores admisibles. En cuanto a los resultados de tensión, estos fueron filtrados para representar únicamente tensiones inferiores a los 200 MPa, aunque, tal y como se explica al final del presente apartado, no se darán puntos con tensiones superiores a dicho valor, siendo posible consultar el valor máximo obtenido en cada caso en los mapas de tensiones del documento *Cálculos*.

Masa				
TOTAL MASS = 55507.				
Desplazamiento Caso II				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	340	1164	28	1164
VALUE	0.62122	-6.5636	-0.60776	6.5669
Desplazamiento Caso III				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	233	1167	18	1167
VALUE	-1.3330	-6.6444	-1.4980	6.8781

Desplazamiento Caso IV				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	245	1164	244	1164
VALUE	-0.41762	-6.6672	0.45684	6.6726
Desplazamiento Caso VI				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	339	1164	27	1164
VALUE	0.67528	-5.5784	-0.66341	5.5976
Desplazamiento Caso VII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	1138	1173	12	1173
VALUE	-2.6457	-5.8159	-2.6229	6.8577
Desplazamiento Caso VIII				
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES				
NODE	UX	UY	UZ	USUM
NODE	241	1164	241	1164
VALUE	-0.43250	-4.4510	0.45568	4.4786

Tabla 12.48 – Masa y desplazamientos máximos de la base y la torre

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los mapas de tensiones de Von Mises y desplazamientos del modelo.

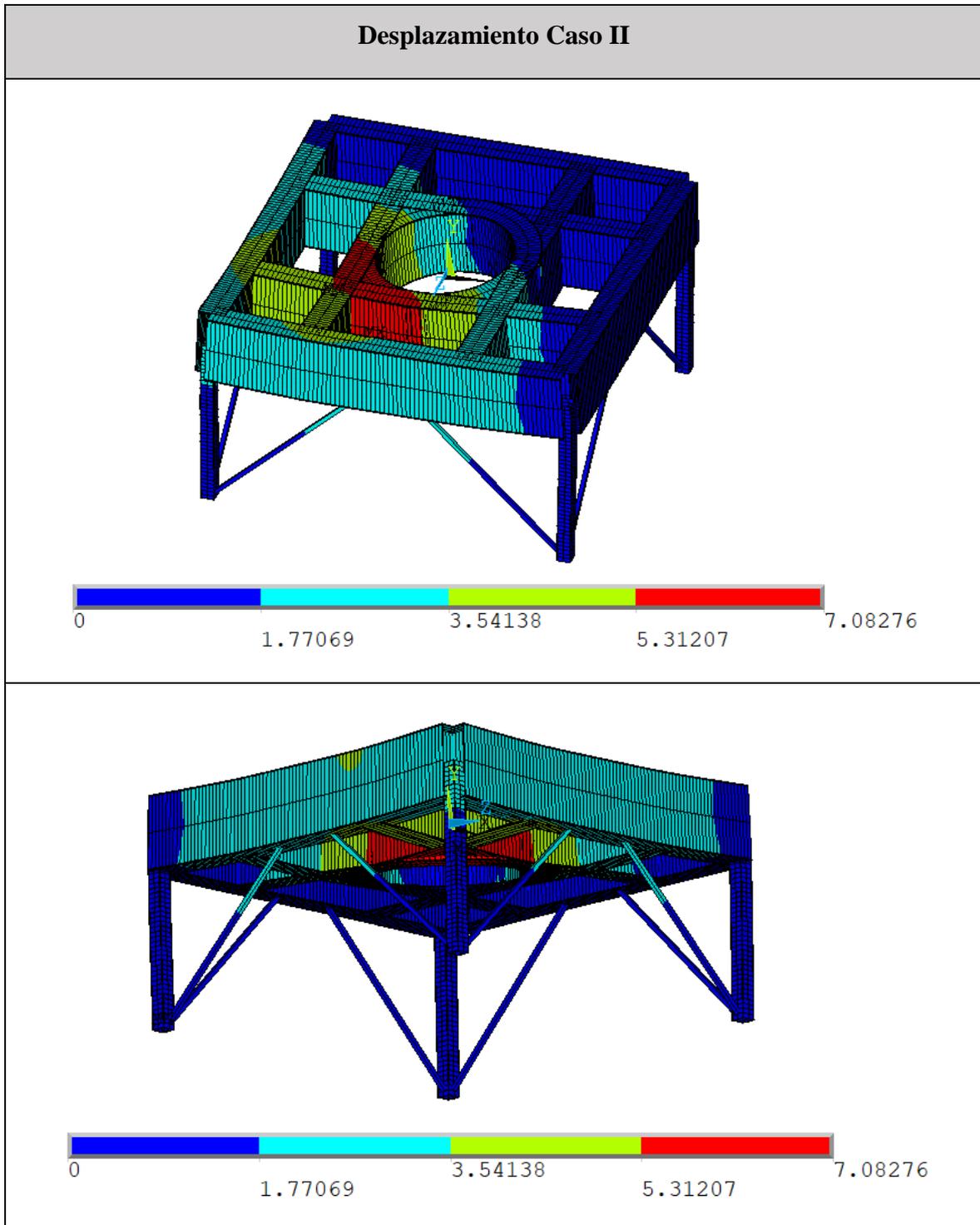


Tabla 12.49 - Desplazamiento de la base y la torre (caso II)

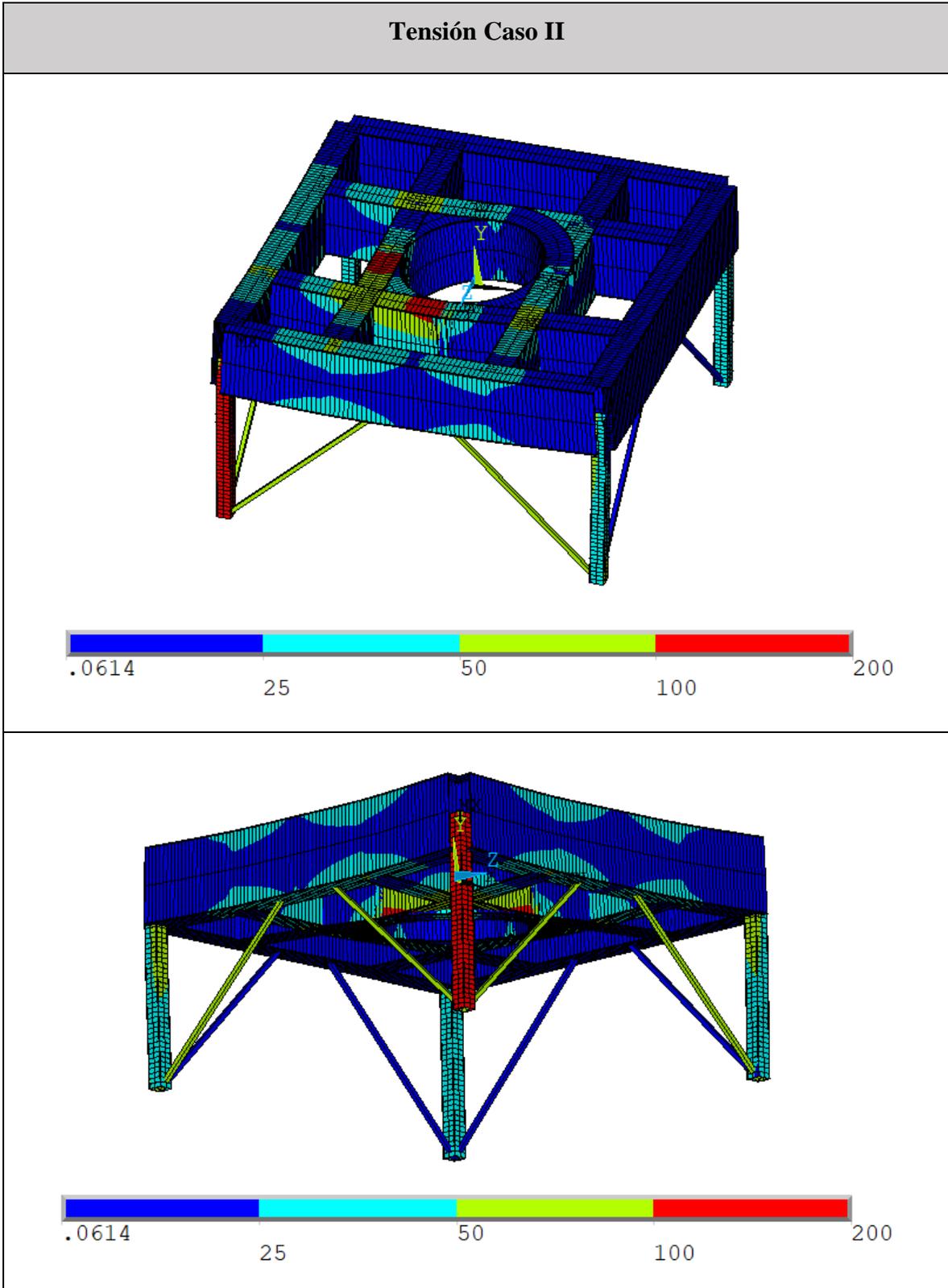


Tabla 12.50 - Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso II)

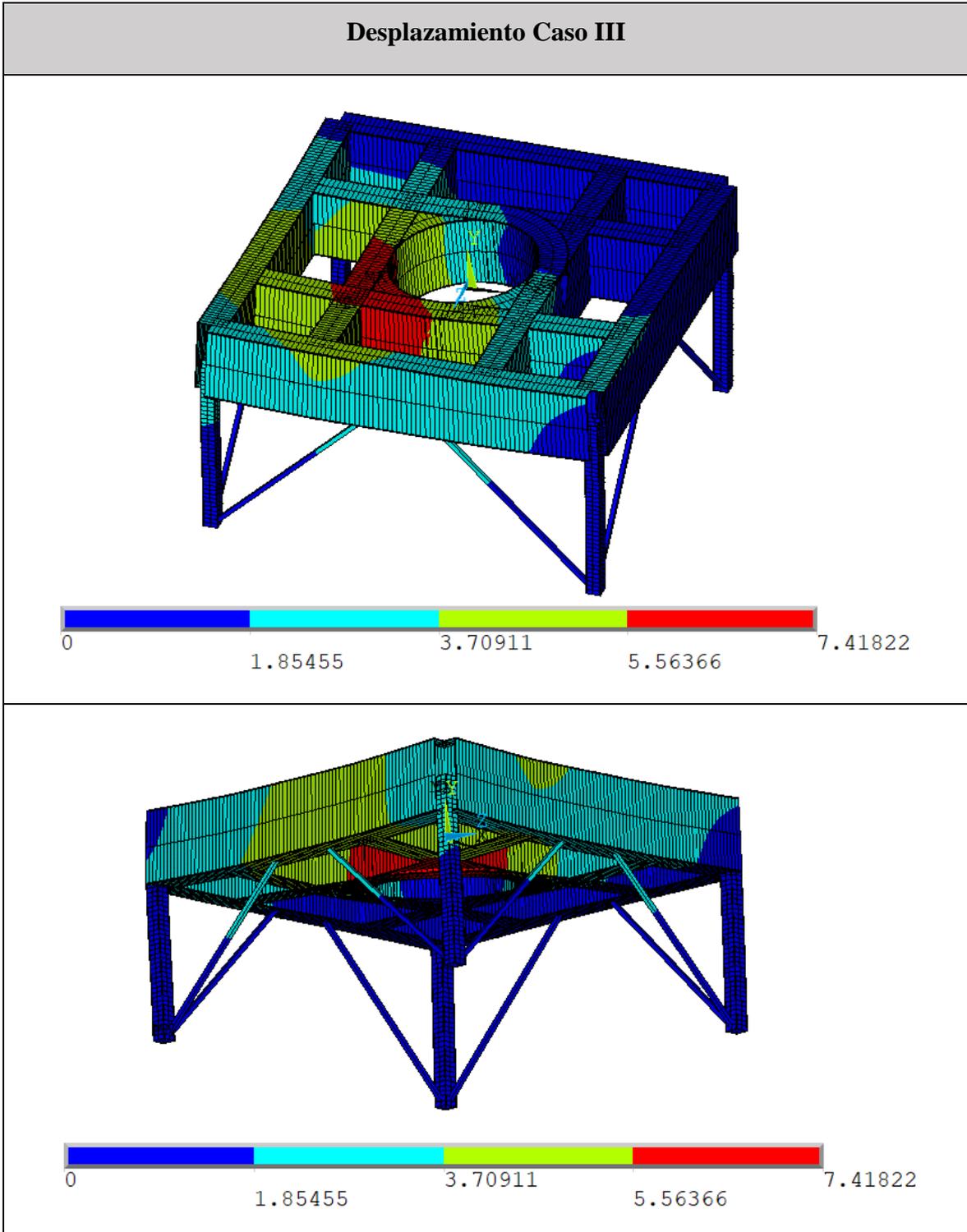


Tabla 12.51 - Desplazamiento de la base y la torre (caso III)

Tensión Caso III

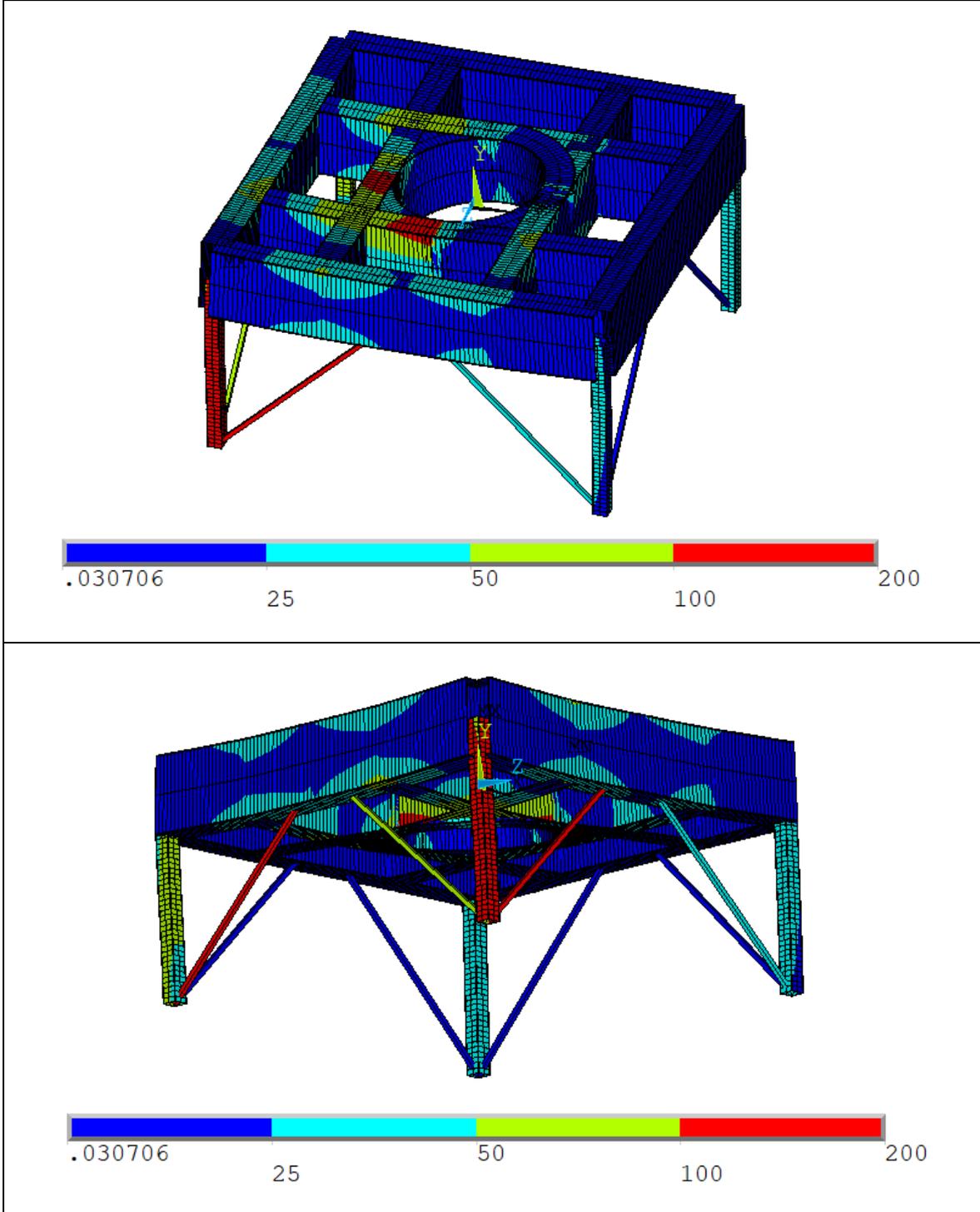


Tabla 12.52 - Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso III)

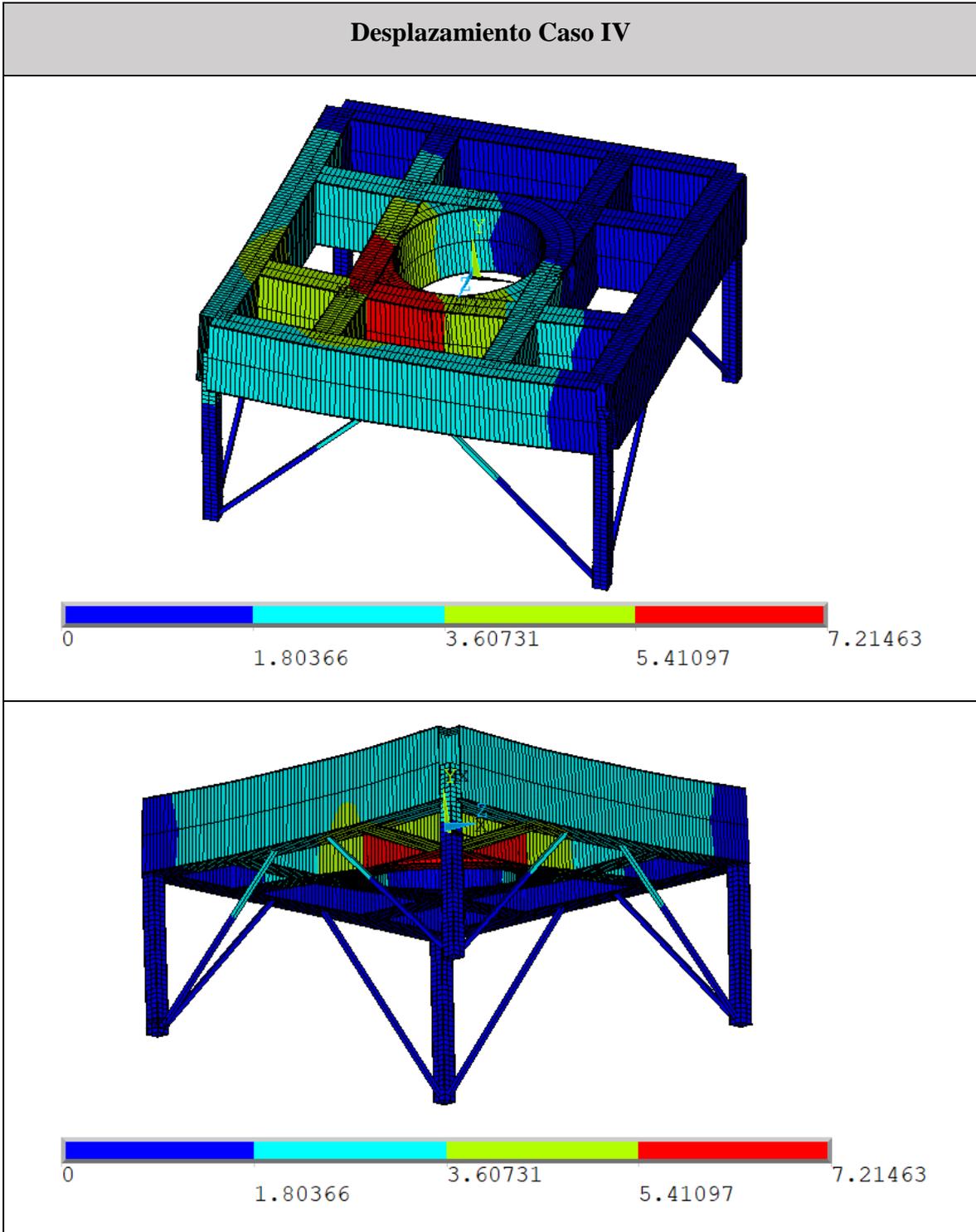


Tabla 12.53 - Desplazamiento de la base y la torre (caso IV)

Tensión Caso IV

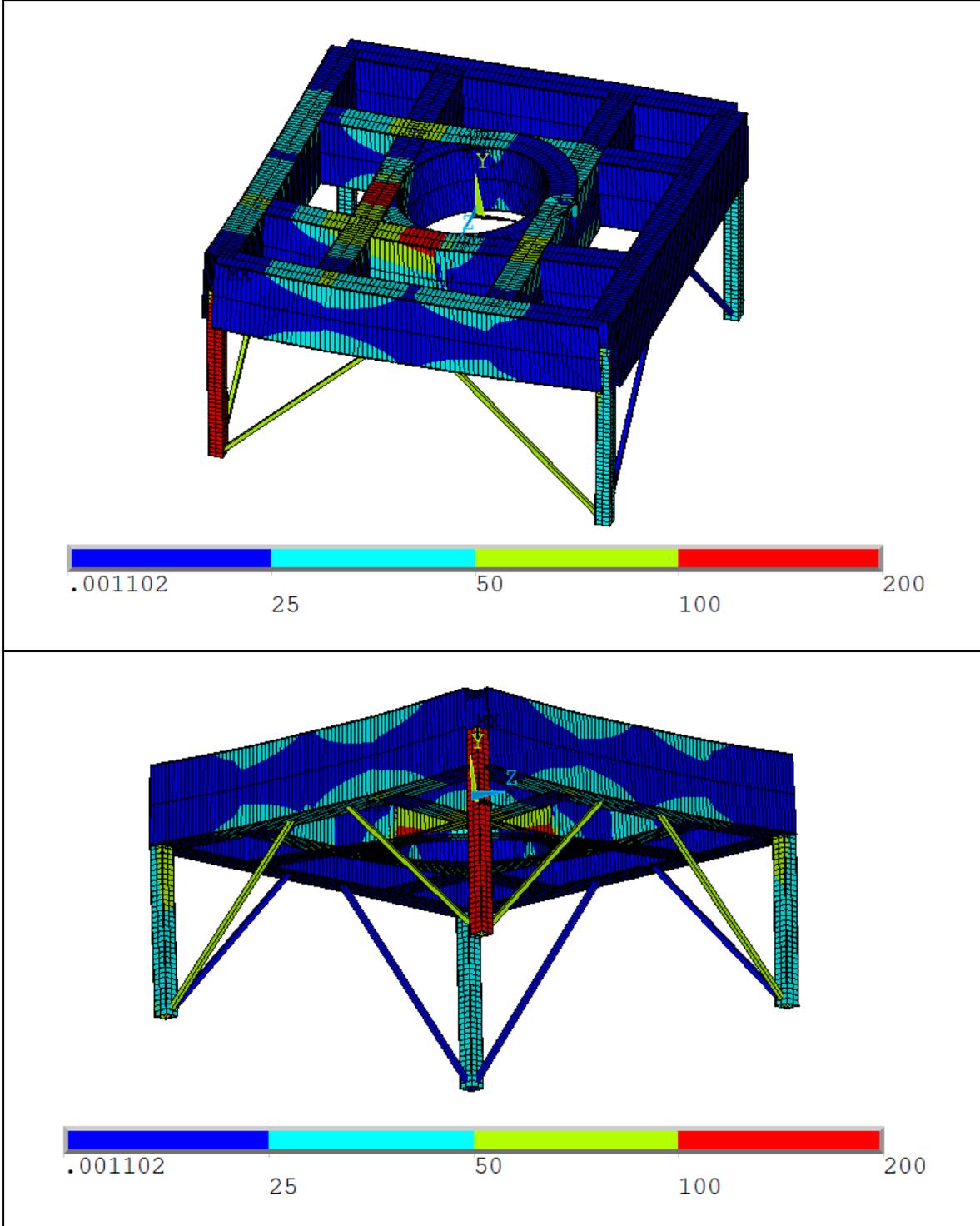


Tabla 12.54 - Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso IV)

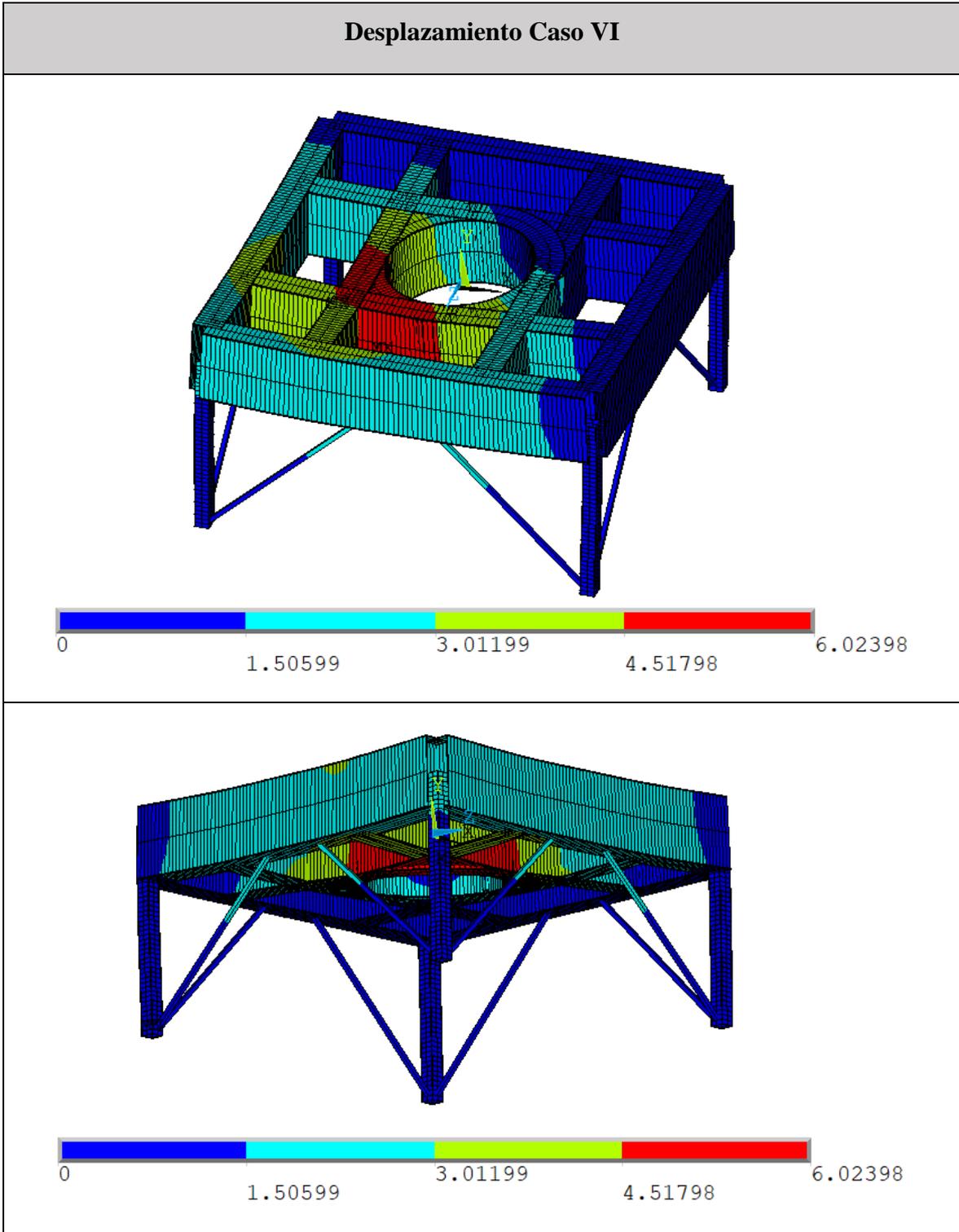


Tabla 12.55 - Desplazamiento de la base y la torre (caso VI)

Tensión Caso VI

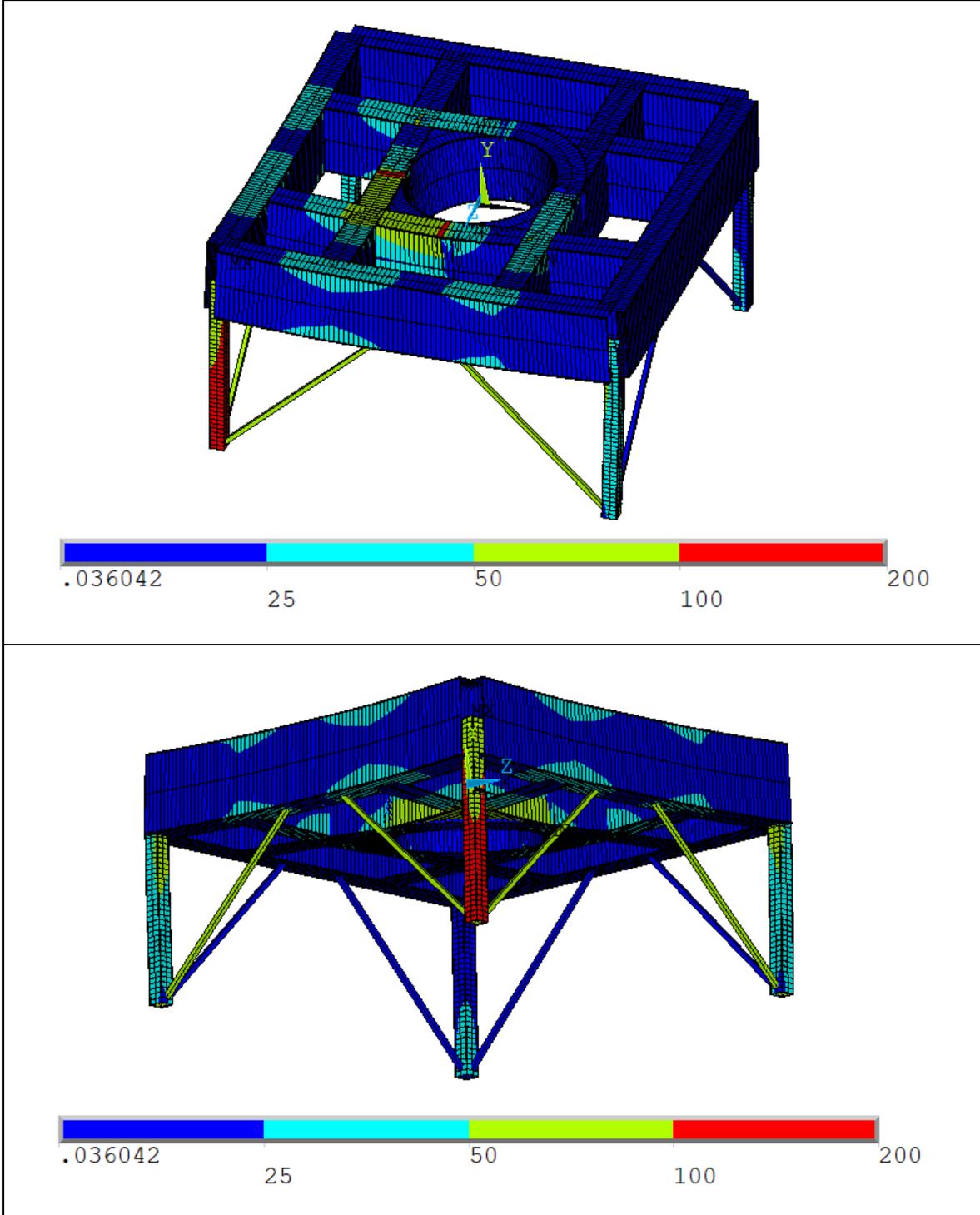


Tabla 12.56 – Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso VI)

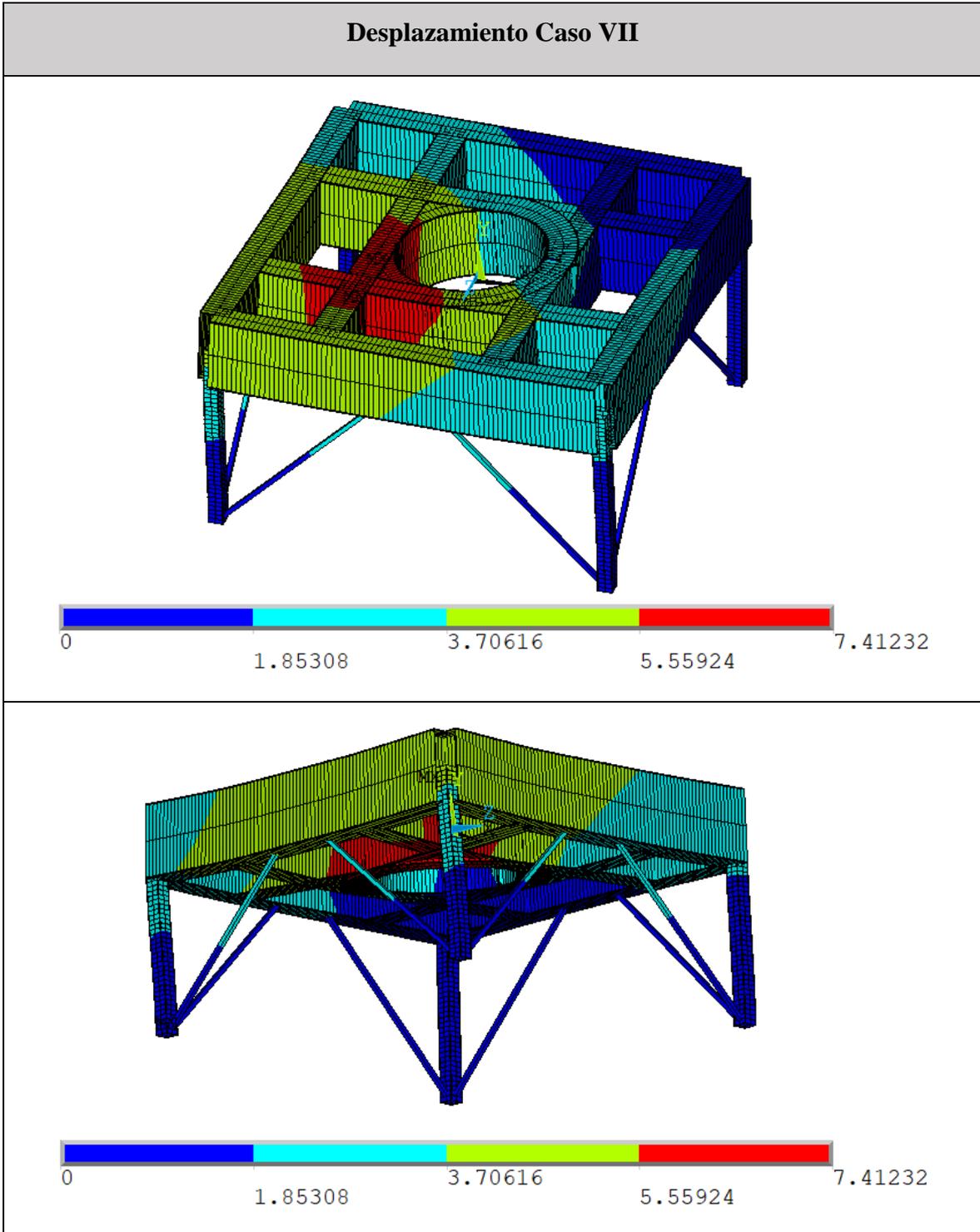


Tabla 12.57 - Desplazamiento de la base y la torre (caso VII)

Tensión Caso VII

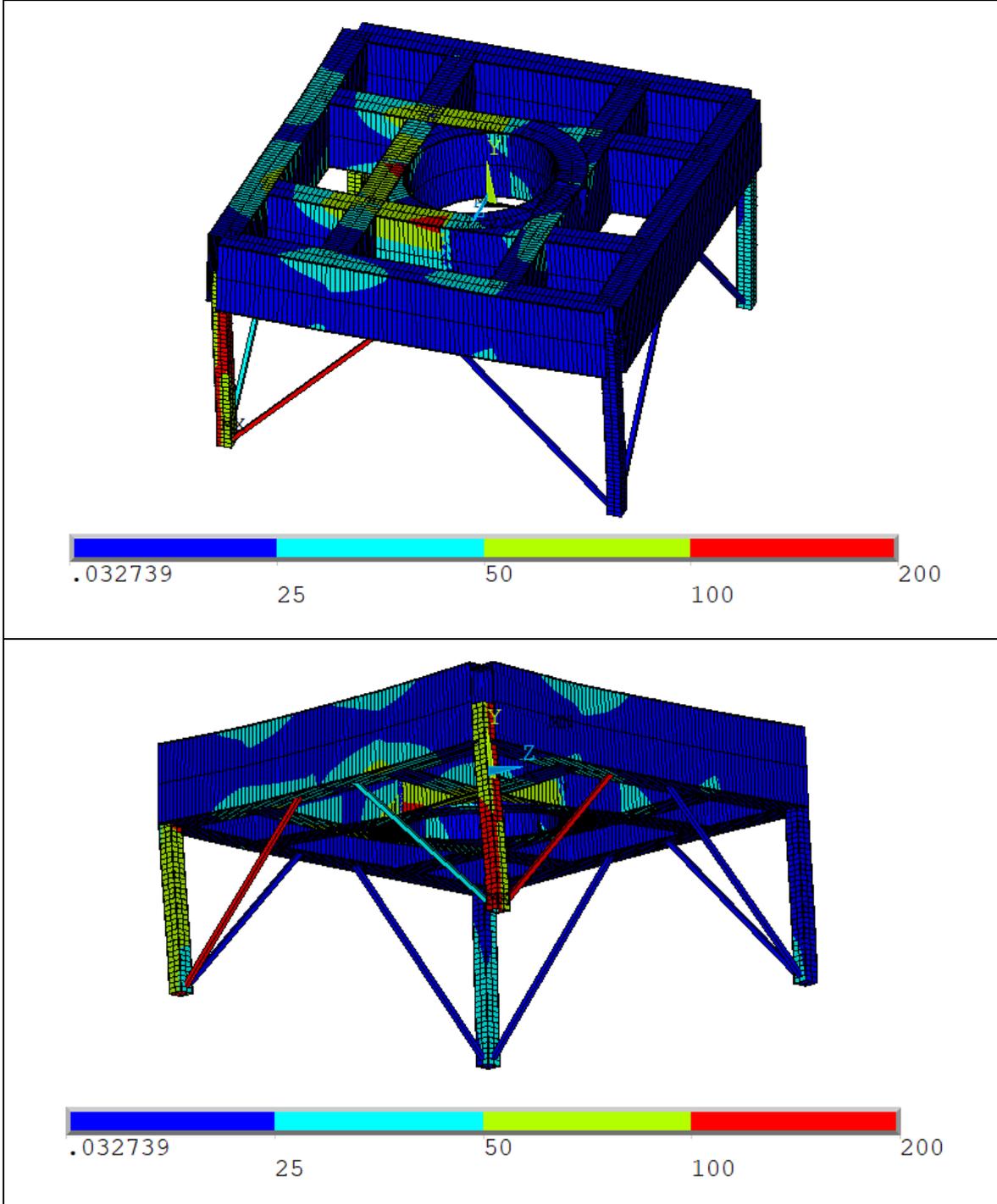


Tabla 12.58 - Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso VII)

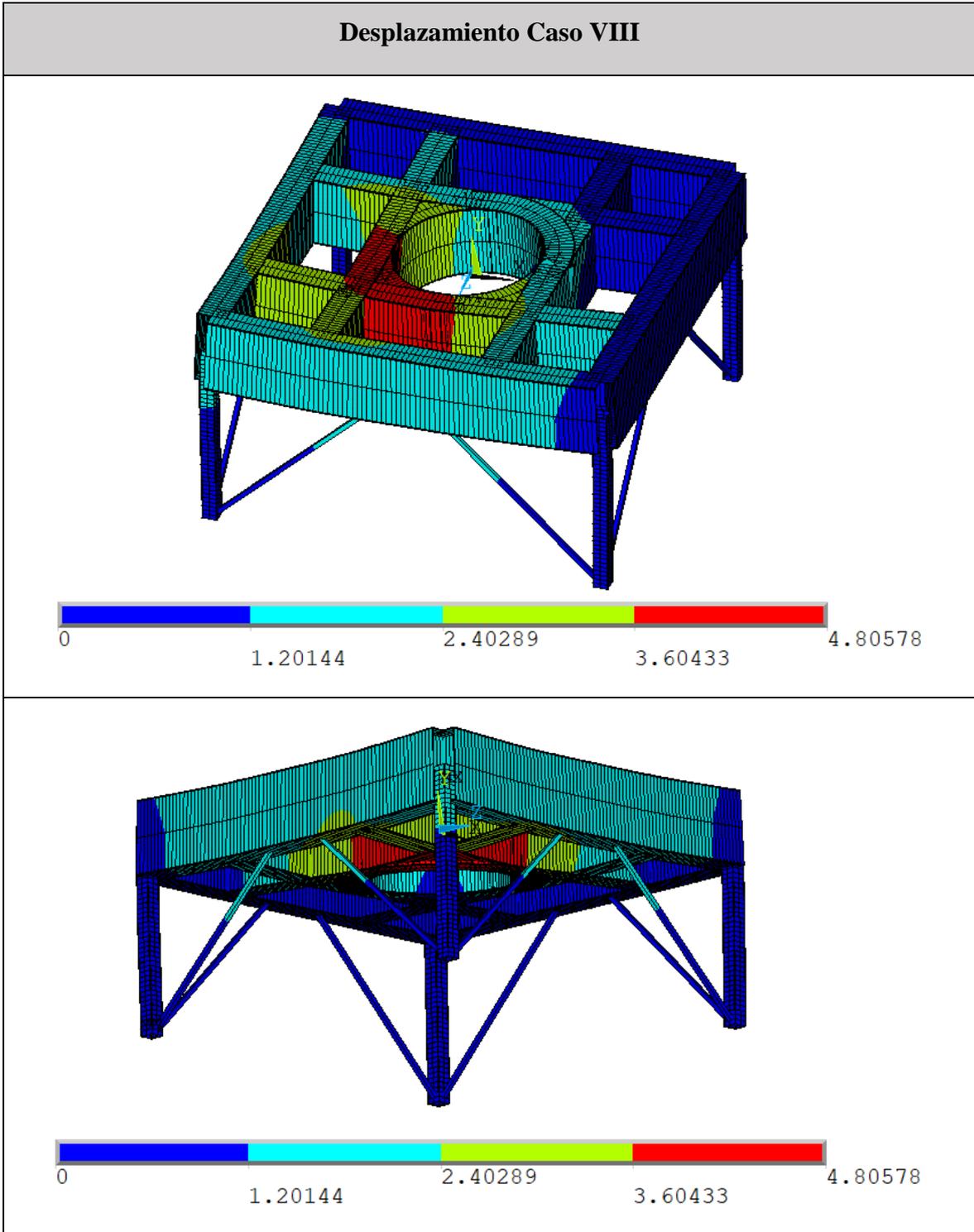


Tabla 12.59 - Desplazamiento de la base y la torre (caso VIII)

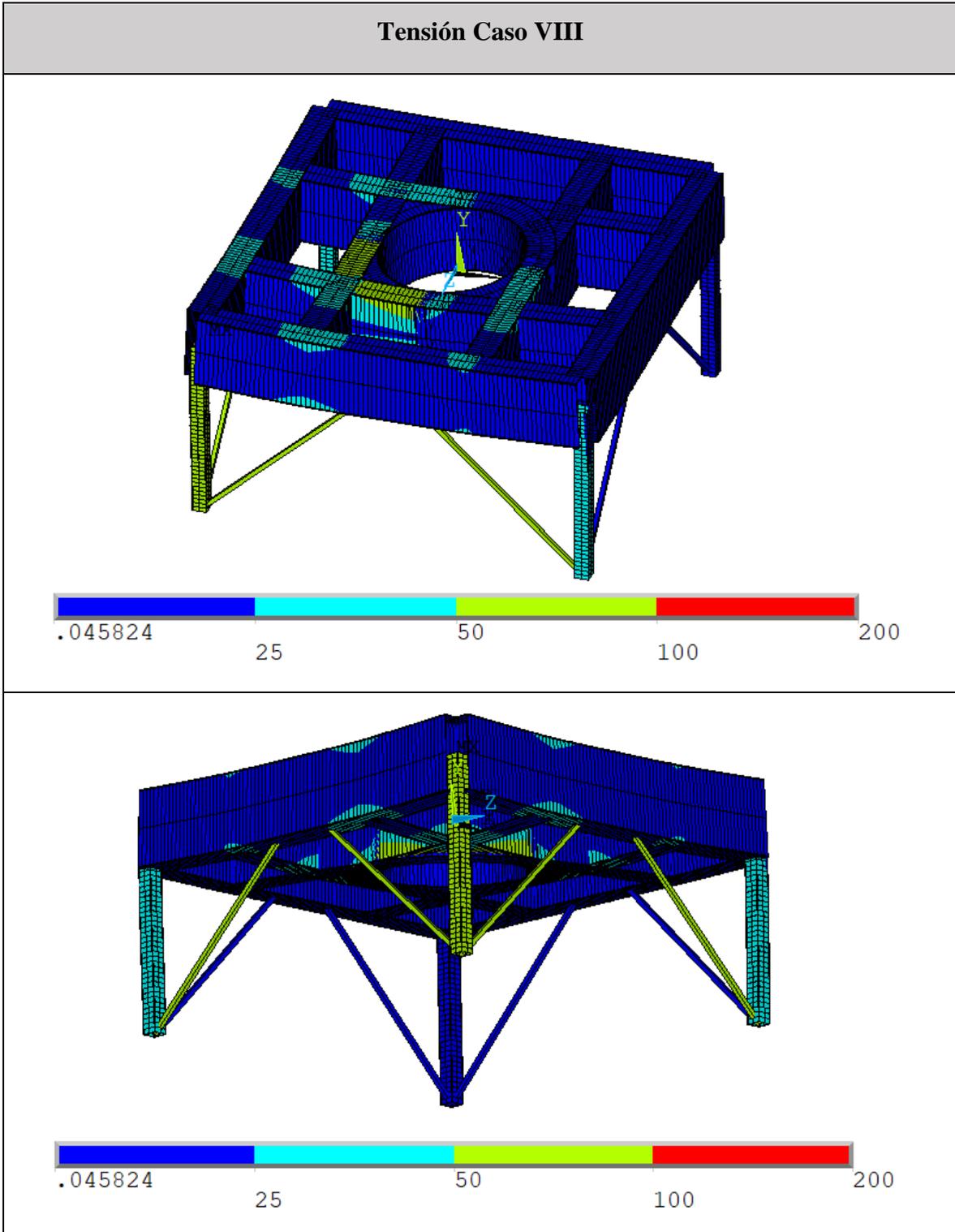


Tabla 12.60 - Tensión de Von Mises en la base y la torre (caso VIII)

Como se puede observar, tras la optimización llevada a cabo en ANSYS, el peso estructural resulta ser unas 4 toneladas mayor al obtenido en el cálculo en Robot.

La máxima flecha se da en el Caso IV (cuando el telescópico está colmatado y el viento incide frontalmente en la parte posterior de la pluma, es decir, el designado como Viento 3 en apartados anteriores) y tiene un valor de 0,67 cm, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos:

$$\frac{0,67}{8 \cdot 10^2} = 0,0008 < \frac{1}{200} \quad (12.3)$$

Tal y como muestran los mapas de tensiones, estas son máximas en el Caso IV (cuando el telescópico está colmatado y el viento incide frontalmente en la parte posterior de la pluma, es decir, el designado como Viento 3 en apartados anteriores) y tienen un valor máximo comprendido entre 100 y 200 MPa. En este caso, debido a la robustez del modelo, no se supera la tensión de 200 MPa en ningún punto, cumpliéndose los criterios de diseño ya conocidos.

12.3.5.- Postprocesamiento del cálculo a pandeo lineal

Una vez finalizado el cálculo estático lineal, se introducirán las operaciones del fichero de pandeo para llevar a cabo una comprobación a pandeo lineal, basado en las siguientes acciones:

- **Lectura de resultados.** Se selecciona el conjunto de resultados que se desea leer. Cada uno de los modos de pandeo se corresponde con un conjunto de resultados distinto.
- **Listado de resultados.** Se visualiza una lista con los valores del coeficiente de pandeo para cada uno de los modos, comprobando que todos ellos sean superiores a tres (un coeficiente de pandeo superior a la unidad asegura que la estructura no sufrirá pandeo, sin embargo, de esta forma, se trabaja del lado de la seguridad).

Coeficiente de pandeo Caso II					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	47.746		1	1	1
2	47.794		1	2	2
3	79.482		1	3	3
4	79.837		1	4	4
5	125.87		1	5	5
6	125.94		1	6	6
7	136.75		1	7	7
8	137.04		1	8	8
9	146.53		1	9	9
10	146.86		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso III					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-143.73		1	1	1
2	-143.58		1	2	2
3	47.299		1	3	3
4	47.348		1	4	4
5	78.734		1	5	5
6	79.081		1	6	6
7	103.99		1	7	7
8	104.16		1	8	8
9	124.68		1	9	9
10	124.76		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso IV					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	-139.26		1	1	1
2	-139.11		1	2	2
3	46.701		1	3	3
4	46.747		1	4	4
5	77.736		1	5	5
6	78.093		1	6	6
7	123.12		1	7	7
8	123.17		1	8	8
9	136.77		1	9	9
10	136.98		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VI					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	58.001		1	1	1
2	58.059		1	2	2
3	96.542		1	3	3
4	96.973		1	4	4
5	147.34		1	5	5
6	147.68		1	6	6
7	152.91		1	7	7
8	152.99		1	8	8
9	156.26		1	9	9
10	156.65		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VII					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	56.664		1	1	1
2	56.733		1	2	2
3	87.027		1	3	3
4	87.163		1	4	4
5	94.301		1	5	5
6	94.670		1	6	6
7	144.40		1	7	7
8	145.28		1	8	8
9	149.26		1	9	9
10	149.50		1	10	10

Coeficiente de pandeo Caso VIII				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	73.739	1	1	1
2	73.808	1	2	2
3	122.69	1	3	3
4	123.28	1	4	4
5	173.07	1	5	5
6	173.23	1	6	6
7	182.15	1	7	7
8	182.32	1	8	8
9	194.40	1	9	9
10	194.45	1	10	10

Tabla 12.61 – Coeficientes de pandeo de la base y la torre

- **Representación de resultados.** Se representan gráficamente los modos de pandeo más desfavorables.

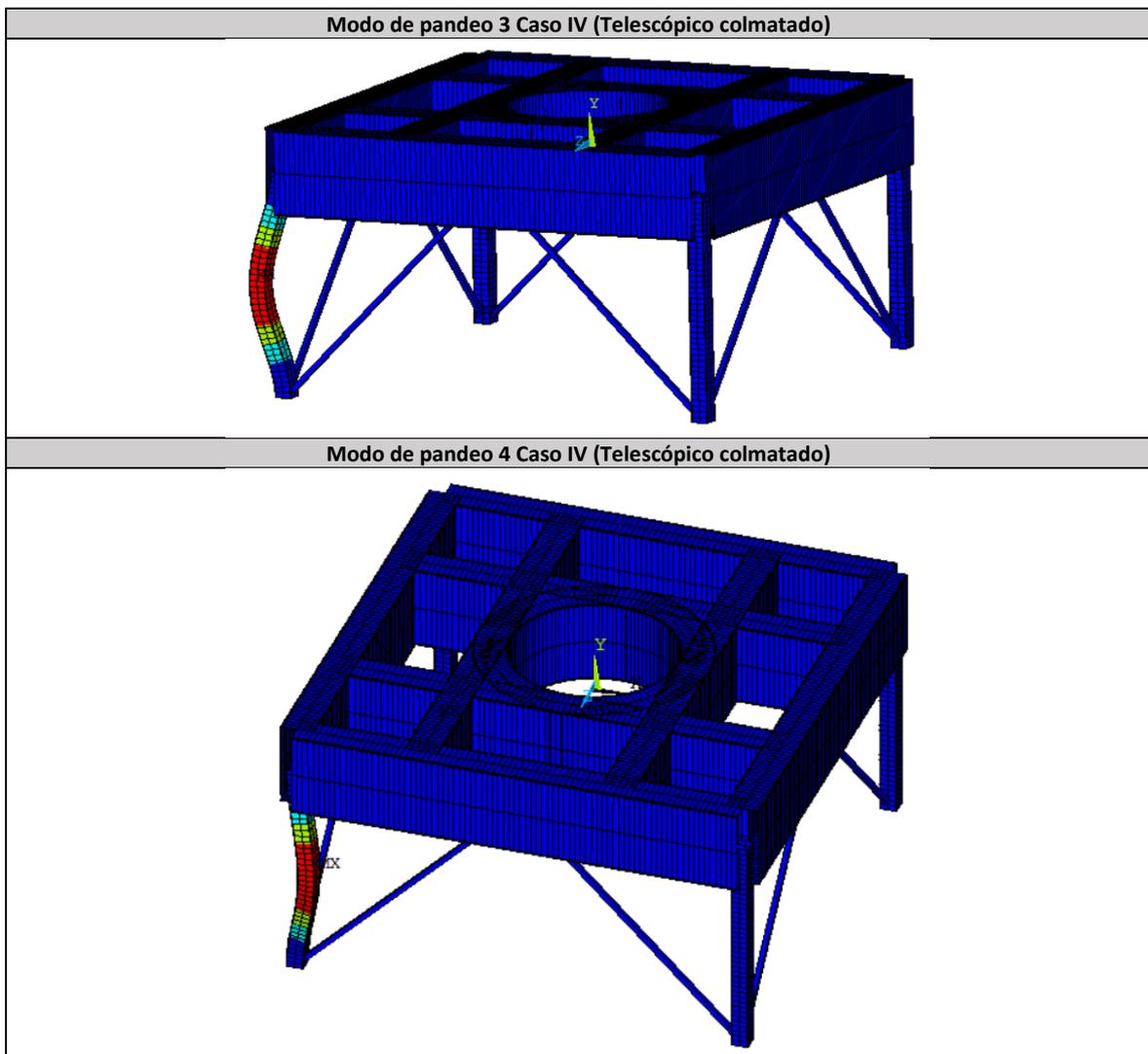


Tabla 12.62 - Modos de pandeo más desfavorables de la base y la torre

Como era de esperar, de acuerdo con las imágenes superiores, en caso de producirse el pandeo, se daría en los pilares de la torre. El resto de modos de pandeo tienen comportamientos similares.

13. Planificación

El presente capítulo recoge una descripción de la planificación de tareas seguida durante la realización del proyecto. Posteriormente, se elaborará un diagrama temporal donde se indicará la duración de cada tarea (considerando semanas de cinco días laborables de seis horas de duración cada uno) y la relación secuencial existente entre ellas.

13.1.- ETAPAS DEL PROYECTO

A continuación, se incluye una breve descripción de las distintas etapas seguidas a lo largo del presente proyecto:

- **Estudio del sector.** Estudio y análisis de los sistemas de manipulación de material a granel existentes, barcos de transporte y cargadores de barcos, prestando especial atención a los cargadores polares.
- **Estudio de las especificaciones impuestas por el cliente.** Estudio y síntesis de las especificaciones impuestas por el cliente para la realización del proyecto.
- **Diseño preliminar de la instalación.** Estudio de la disposición de los distintos elementos de la instalación y elaboración simplificada de los planos del cargador.
- **Diseño, cálculo y optimización de la cinta transportadora.** Diseño, cálculo y optimización de la cinta transportadora situada sobre la pluma del cargador. Se llevaron a cabo un cálculo simplificado y un cálculo completo de la cinta, desarrollando ambos tanto de forma manual, como a través de softwares específicos (en primer lugar, un software desarrollado por la empresa y, posteriormente, el programa BeltStat).

- **Cálculo de las cargas.** Cálculo de las distintas cargas a tener en cuenta en el diseño de estructuras según la Federación Europea de Manipulación de materiales (FEM [17]). Cálculo y selección de las ruedas de apoyo de la pluma sobre el cradle del cargador a partir de las cargas consideradas.
- **Diseño alámbrico, cálculo y optimización del cargador.** Diseño, cálculo estructural (estático y a pandeo lineal) y optimización del cargador de barcos a partir de un modelo alámbrico del mismo mediante el software Robot Structural Analysis Professional.
- **Cálculo y selección de los accionamientos.** Cálculo y selección de los mecanismos de traslación y de giro del cargador.
- **Cálculo y selección de los anclajes de la torre.** Cálculo y selección de los anclajes de la torre del cargador.
- **Modelado tridimensional del cargador.** Generación de los modelos tridimensionales CAD de los distintos elementos del cargador en SolidWorks para su posterior procesamiento en un software de elementos finitos.
- **Análisis del cargador mediante el método de los elementos finitos.** Modelización tridimensional, análisis mediante el método de los elementos finitos y optimización del cargador en ANSYS Mechanical APDL.
- **Generación de la documentación.** Elaboración de la documentación de la panificación y del presupuesto del proyecto, junto al resto de capítulos tratados en la memoria. Generación de los planos definitivos de la instalación e informes de cálculo.

13.2.- PROGRAMACIÓN TEMPORAL

La tabla inferior recoge la programación temporal del proyecto, indicando la duración de cada tarea y la secuencia seguida:

ETAPA	SEMANA																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Estudio del sector																				
Estudio de las especificaciones impuestas por el cliente																				
Diseño preliminar de la instalación																				
Diseño, cálculo y optimización de la cinta transportadora																				
Cálculo de las cargas																				
Diseño alámbrico, cálculo y optimización del cargador																				
Cálculo y selección de los accionamientos																				
Cálculo y selección de los anclajes de la torre																				
Modelado tridimensional del cargador																				
Análisis del cargador mediante el método de los elementos finitos																				
Generación de la documentación																				

Tabla 13.1 - Programación temporal del proyecto

14. Presupuesto

La documentación asociada al presupuesto del presente proyecto, donde se justifica un valor final de cincuenta y tres mil cuatrocientos treinta y tres euros con cuarenta y ocho céntimos, puede consultarse en el documento *Presupuesto*.

15. Conclusiones

De acuerdo a las especificaciones, el empleo de un cargador de barcos polar resulta ser la solución óptima para la carga de barcasas en el muelle propuesto.

Se llevaron a cabo cálculos manuales y computerizados (a través de distintos softwares) de la cinta transportadora, llegando a una conclusión común en todos ellos: se instalará un único grupo de accionamiento de 11 kW de potencia para mover una banda transportadora de 800 mm a 2,62 m/s y cumplir las especificaciones impuestas por el cliente.

El modelado alámbrico del cargador en Robot permitió realizar un predimensionamiento rápido y eficaz del mismo. Este tipo de software permite combinar distintos modelos y realizar modificaciones sobre los mismos fácilmente, por lo que se analizó el comportamiento del cargador para distintas posiciones y orientaciones de la pluma. Se comprobó el cumplimiento de las condiciones de tensión y flecha admisibles en todos los elementos estructurales.

La instalación de un mecanismo piñón-cremallera con transmisión por cadena y un engranaje planetario que gira sobre un rodamiento axial como accionamientos de traslación y giro, respectivamente, resulta una solución apropiada para el cargador objeto de estudio. Se seleccionarán para ello motorreductores de 15 kW y motores de 11 kW.

El empleo de cuatro anclajes por cada pilar de la torre de 36 mm de diámetro permite soportar a tracción el vuelco del cargador, no siendo necesario el empleo de contrapesos y la realización de cálculos de estabilidad. Se comprobó que la máxima tensión soportada por los anclajes fuera inferior a la máxima tensión admisible.

El modelado tridimensional del cargador en SolidWorks permitió un diseño sencillo y rápido de los distintos elementos estructurales estudiados para su posterior exportación a un programa de elementos finitos.

El análisis mediante el método de los elementos finitos del cargador en ANSYS hizo posible obtener modelos tridimensionales más próximos a la realidad, llevar a cabo cálculos estructurales más precisos y optimizar el cargador, dando lugar al diseño definitivo del mismo. Este tipo de software está más restringido en cuanto a la combinación y modificación de los distintos modelos, además de presentar tiempos de cálculo considerablemente superiores, por lo que se analizó únicamente el comportamiento del cargador para para la posición y orientación de la pluma más desfavorable (pluma totalmente extendida orientada a 45°). Se comprobó el cumplimiento de las condiciones de tensión y flecha admisibles en todos los elementos estructurales.

El presupuesto total del presente proyecto tiene un valor de cincuenta y tres mil cuatrocientos treinta y tres euros con cuarenta y ocho céntimos, precio que solamente estaría justificado si se pudiera amortizar con la venta del equipo. Sería necesario para ello valorar la compra de material, la ejecución del proyecto y la venta del equipo.

El presente proyecto podría ser complementado con un cálculo a pandeo no lineal (más apropiado para el estudio de estructuras que sufrieron un fallo a pandeo a partir de una determinada deformación inicial), un análisis del modelo completo en ANSYS a través del uso de *Superelementos* (su importancia es mayor cuando el diseño de la máquina es totalmente novedoso) o el empleo de rigidizadores en el interior de los distintos perfiles (permitiría aligerar la estructura).

Como conclusión general, los softwares empleados se tratan de herramientas con grandes potencias de cálculo a la hora de detectar los puntos críticos y optimizar la estructura. Además, al tratarse de herramientas de dibujo paramétrico, es posible modificar y combinar modelos para estudiar distintas posiciones de trabajo o instalaciones con una configuración similar, pero capacidades y dimensiones distintas.

Dada la naturaleza de la máquina analizada, la simulación por ordenador resulta la opción de cálculo más adecuada frente al cálculo manual o la realización de prototipos a escala, dando lugar a un ahorro importante en tiempos y costes. La precisión de los cálculos manuales sería muy inferior, adoptando un alto sobredimensionamiento como criterio de diseño. La realización de prototipos a escala carece de sentido en este caso, donde se desarrollan diseños a medida para las necesidades concretas de la instalación, en lugar de fabricaciones en serie.

El diseño tridimensional y análisis mediante el método de los elementos finitos se presenta como la herramienta ideal para el diseño, cálculo y optimización de máquinas de mantenimiento continua, dado que el diseñador tiene el control absoluto sobre la modelización y fiabilidad de los resultados.

16. Bibliografía

- [1] «Web de la compañía NSK Motion & Control,» [En línea]. Available: <http://www.nskeurope.es/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [2] «Portal Maritime Connector,» [En línea]. Available: <http://maritime-connector.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [3] «Web de la sociedad portuaria Puerto de Barranquilla,» [En línea]. Available: <http://www.puertodebarranquilla.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [4] «Web de la compañía Thyssenkrupp,» [En línea]. Available: <http://www.thyssenkrupp-industries-india.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [5] «Web de la compañía Agrico Sales,» [En línea]. Available: <http://agricosales.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [6] «Web de la compañía CMC Engineering,» [En línea]. Available: <http://cmcengineering.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [7] «Web de la compañía Sandvik,» [En línea]. Available: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [8] «Web de la compañía EMS Tech,» [En línea]. Available: <https://www.ems-tech.net/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [9] «Portal Maritime Journal,» [En línea]. Available: <http://www.maritimejournal.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [10] «Web de la compañía Bedeschi,» [En línea]. Available: <http://www.bedeschi.com/>. [Último acceso: Febrero 2018].

- [11] «Web de la compañía FAM Engineering,» [En línea]. Available: <http://www.fam.de/>. [Último acceso: Febrero 2018].
- [12] Agustín López Roa, Cintas transportadoras, CIE Dossat 2000, 2002.
- [13] Esbelt, Vademecum bandas transportadoras.
- [14] Firestone Hispania, Catálogo bandas transportadoras INDY.
- [15] UNE 58-204-92, Aparatos de manutención continua. Cintas transportadoras provistas de rodillos portantes. Cálculo de la potencia disponible y esfuerzos de tracción, 1992.
- [16] NORD Drivesystems, Helical Bevel Gears Block IE3 Premium Efficiency Catalog, 2018.
- [17] Federation Europeenne de la Manutention Section II, Rules for the Design of Mobile Equipment for Continuous Handling of Bulk Materials, 1997.
- [18] Division Hennlich Engineering, Telescopic Loading Spouts.
- [19] «Web de la compañía Hansa Heavy Lift,» [En línea]. Available: <https://www.hansaheavylift.com/>. [Último acceso: Marzo 2018].
- [20] EN 1990:2002+A1, Eurocode - Basis of structural design, 2002.
- [21] EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2005.
- [22] WEG, W22 - Cast Iron Frame - Premium Efficiency - IE3 Catalog, 2018.
- [23] Dywidag - Systems International, Gama de Productos Geotécnicos Dywidag.
- [24] Carlos Arias Cuesta, V Curso de especialista universitario en teoría y aplicación práctica del método de los elementos finitos y simulación. AP.1 Curso

introdutorio de utilización del programa de aplicación y prácticas, INGECIBER S.A., Curso 1998-1999.

- [25] Honorato Girau Alonso, V Curso de especialista universitario en teoría y aplicación práctica del método de los elementos finitos y simulación. AP.2 Técnicas de modelado de sólidos y mallado automático, INGECIBER S.A., Curso 1998-1999.