

# DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE ACERO PARA UN EXTRACTOR DE ACEITE ROTATIVO

**Chevez, Hugo Alberto; Movia, Marina Graciela**

Ingenieros Civiles / Cotto+Chevez Ingeniería / estudio@cotto-chevez.com.ar

## RESUMEN

La operación eficiente, segura y durable de un extractor de aceite por solvente rotativo depende del correcto diseño y detallamiento de su estructura de acero, de atípica geometría, debido a los requerimientos de estanqueidad operativa, por la naturaleza altamente inflamable y volátil del hexano empleado como solvente, y de accesibilidad para las tareas de mantenimiento, entre otros factores.

La estructura está compuesta por una corona circular de celdas radiales que, montada sobre un eje vertical dentro de una carcasa cilíndrica cerrada y fija, gira a muy baja velocidad. La carcasa cuenta con una cubierta plana con emparrillado para soporte de plataformas de trabajo y equipos, un piso filtrante sustentado por vigas radiales, un troncocono inferior nervurado para recolección de líquidos oleaginosos, una tolva para descarga del material procesado, y un soporte para el equipo motriz.

Las dimensiones de estos equipos varían entre 6-23m de diámetro y 6-9m de altura, pudiendo alcanzar pesos de más de 500 tn de acero. En este trabajo se analiza el caso particular de un extractor de 15m de diámetro. Se describen los sistemas estructurales considerados, los criterios de determinación de acciones de operación y extraordinarias, y los coeficientes de seguridad adoptados. Se presentan también los modelos de elementos finitos desarrollados para el análisis estructural, sus resultados y verificaciones.

## ABSTRACT

*The efficient, safe and durable operation of a rotary solvent oil extractor strongly depends on the design and detailing of its geometrically atypical steel structure due to, among other factors, the sealing required by the highly flammable and volatile nature of the hexane used as solvent, and the accessibility needed for maintenance.*

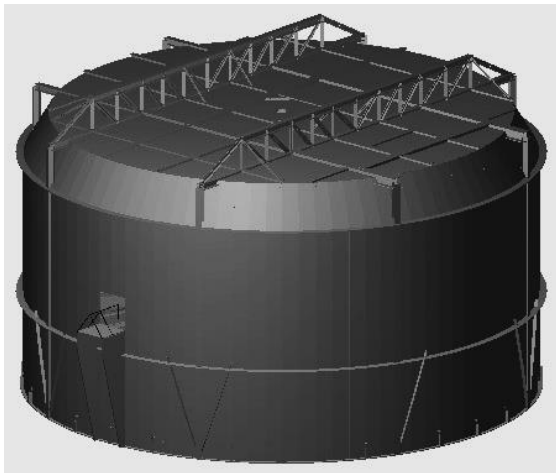
*The structure is composed of an annular basket of radial cells which, mounted on a vertical axis inside a fixed cylindrical housing shell, rotates at very low speed. The housing shell has a flat roof with framework for platforms and equipment, a screen floor supported by radial beams, a conical reinforced frustum for miscella recovery, a dump hopper for processed material discharge, and a support for the main driving unit.*

*These structures can be 6-23m wide and 6-9m high, weighing up to more than 500 tonne. This paper analyzes the particular case of a 15m diameter extractor, describing the structural systems considered, the criteria for load case determination and the adopted safety factors. The Finite Element models developed for structural analysis are also presented, showing their results and design checks.*

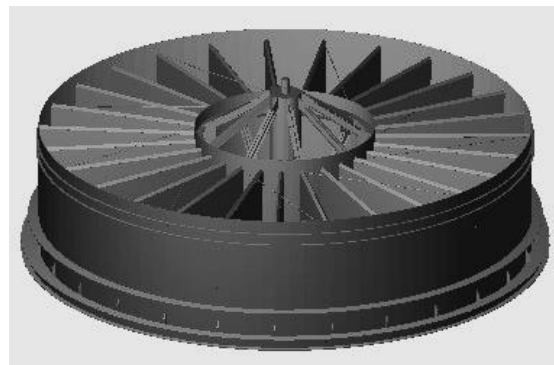
## 1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un caso especial de la aplicación de la ingeniería estructural que se aparta de los clásicos de edificios y obras civiles en general. Se trata del análisis estructural de un equipo industrial de tipo rotativo para la producción de aceites vegetales mediante el método de extracción por solvente. La naturaleza altamente volátil e inflamable del hexano comercial normalmente empleado como solvente requiere del cumplimiento de normas de seguridad extremas para evitar fugas y la hermeticidad es un requisito de suma importancia.

La estructura de acero de un extractor de este tipo está compuesta por una subestructura giratoria o “carousel”, alojada dentro de una subestructura fija o “carcasa” de contorno cilíndrico, herméticamente cerrada mediante una cubierta plana y un fondo troncocónico invertido. Las uniones entre las componentes móviles y fijas deben detallarse de modo de asegurar su total hermeticidad durante la operación, y a su vez, proyectarse desmontables para permitir la inspección, mantenimiento y eventual reemplazo de los rodamientos.



*Figura 1 – Carcasa fija exterior.  
Vista general del modelo 3D.*



*Figura 2 – Carousel giratorio interior.  
Vista general del modelo 3D.*

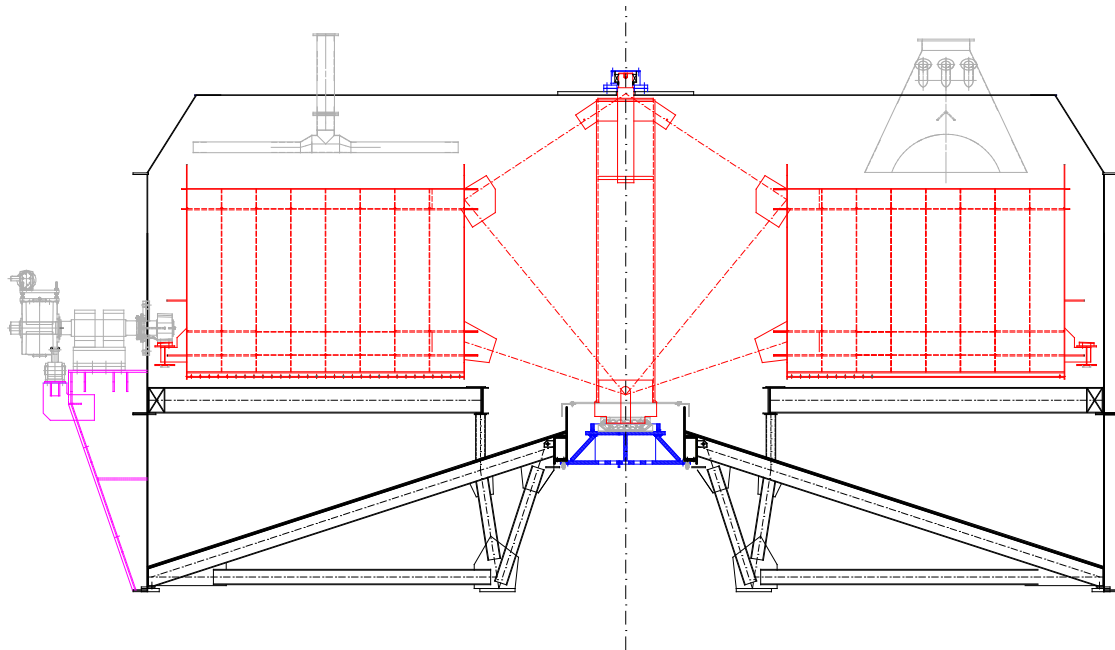
Estos equipos, por sus dimensiones, formas de sustentación y los particulares estados de cargas a los que están sometidos, deben contar con una resolución estructural adecuada que asegure sus condiciones de resistencia y de deformaciones respetando los exigentes requerimientos del proceso industrial y del funcionamiento mecánico, todo esto al menor costo posible.

Son equipos de tamaño variable según el modelo de que se trate, que pueden alcanzar diámetros de hasta 23 m, aunque ya hay en proyecto uno de 26 m de diámetro, y alturas de hasta 10 m. En este caso se describe el diseño del modelo RE150, cuya carcasa es de aproximadamente 15 m de diámetro y 8 m de altura.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

### 2.1. Componentes del extractor

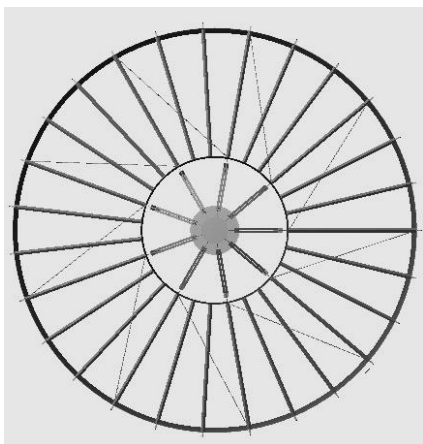
La estructura resistente del extractor está compuesta por el carousel interior, la carcasa fija exterior y los dispositivos de vinculación entre ambas subestructuras.



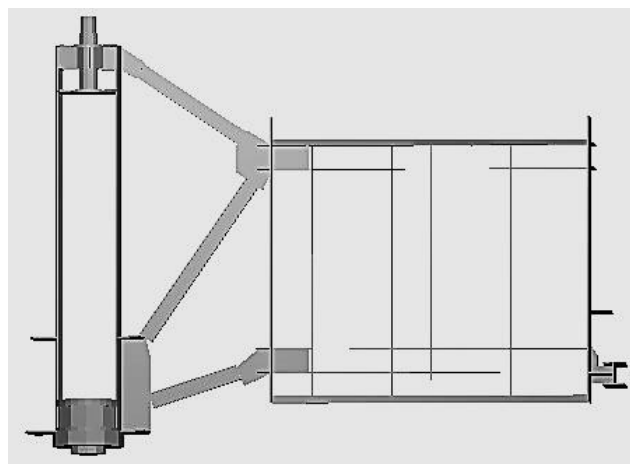
*Figura 3 – Corte vertical del extractor completo.*

### 2.2. El carousel.

El carousel interior está compuesto por una corona circular sin fondo ni tapa, subdividida en 27 compartimentos mediante tabiques divisorios radiales, y vinculada al eje de giro central mediante un sistema de bielas dispuestas en 9 planos verticales radiales de manera de cubrir armónicamente toda la circunferencia.

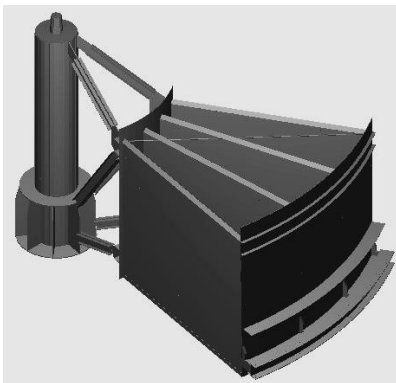


*Figura 4 – Carousel completo.  
Vista en Planta Superior.*

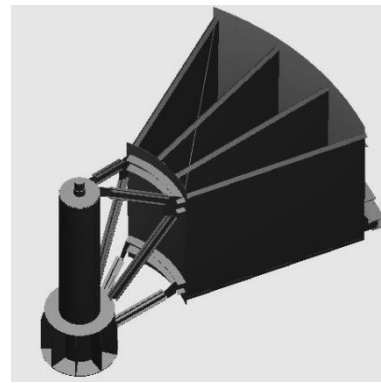


*Figura 5 – Corte Vertical parcial.  
Tabique Vinculado al eje.*

La corona, de 3900 mm de altura propia, está formada por una envuelta exterior de chapa de 10 mm de espesor y 6850 mm de radio, y una envuelta interior de 8 mm de espesor y 2515 mm de radio. Ambas envueltas cuentan con pares de anillos rigidizadores cercanos al extremo superior y al extremo inferior. Los anillos de la envuelta interior funcionan como vigas anulares horizontales apoyadas radialmente en las barras superiores e inferiores del sistema de barras de vinculación. Los anillos exteriores funcionan como vigas anulares horizontales apoyadas radialmente en los tabiques vinculados al eje central. A fin de asegurar el movimiento giratorio conjunto de ambas envueltas, las mismas se vinculan entre sí mediante un sistema de tensores dispuesto a nivel del remate superior de los tabiques divisorios. Los tensores se extienden sobre tres recintos, de modo de que sus extremos coincidan con los extremos superiores de tabiques vinculados al eje.



*Figura 6 – Módulo de 3 recintos entre planos de vinculación al eje. Anillos exteriores y porta-cremallera.*



*Figura 7 – Módulo de 3 recintos entre planos de vinculación al eje. Anillos interiores y vinculación al eje.*

Los paneles divisorios, de 3600 mm de altura propia, cuentan con una sección transversal compuesta por dos caras laterales de chapa de 6 mm de espesor, separadas aproximadamente 135 mm en su extremo superior y con una ligera pendiente negativa para facilitar la caída del producto. En el remate superior se dispone un deflector de 100x100, mientras que en el extremo inferior se dispone un fleje vertical cuyo borde inferior termina 30mm por encima del nivel superior del piso filtrante, para evitar fricción del panel sin permitir escape del producto del recinto.



*Figura 8 – Tabique Divisorio. (a) Vista exterior (b) Interior.*

Las caras laterales se vinculan entre sí mediante un sistema de rigidizadores interiores verticales de 8 mm de espesor uniformemente distribuidos a lo largo del panel. Se dispone a su vez un sistema de rigidizadores horizontales interiores en los extremos superior e inferior del tabique, en coincidencia con los anillos de la corona. Los rigidizadores horizontales se adoptaron de 8 mm de espesor a excepción de los correspondientes al extremo interior superior e inferior de los tabiques vinculados al eje, para los cuales se precisó espesores de 20 mm y 16mm respectivamente. En dichos extremos ingresan al tabique prolongaciones de las chapas de nudo de las barras de vinculación. Así, se obtuvo un panel de sección compuesta con suficiente resistencia y rigidez para un espesor reducido de las chapas laterales.

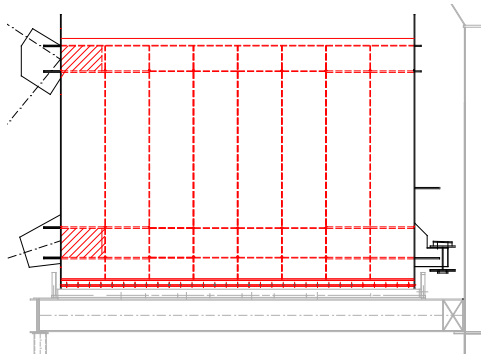


Figura 9 – Tabique vinculado al eje.

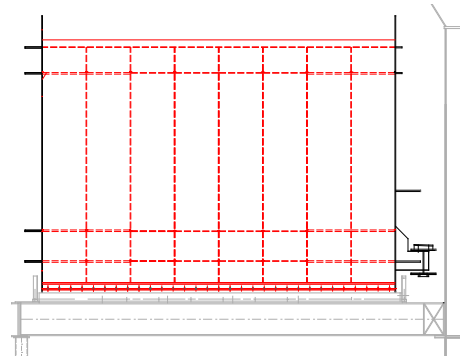


Figura 10 – Tabique no vinculado al eje.

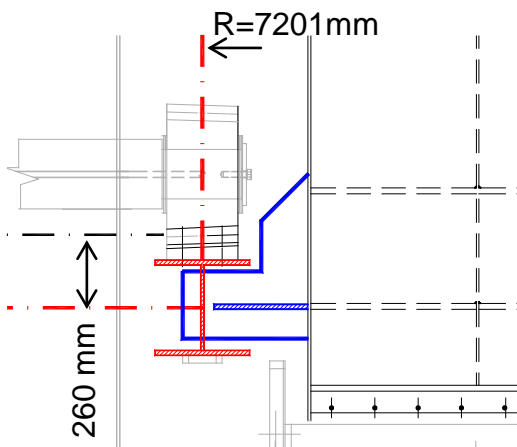


Figura 11 – Cremallera perimetral, viga soporte y ménsulas de apoyo.

Por fuera de la envuelta exterior se dispone una cremallera perimetral de radio medio 7,20m sobre la cual se aplicará la fuerza necesaria para el giro del carousel. La misma apoya abulonada al ala superior de una viga de planta circular y sección doble te de 340mm de altura total. La viga se proyectó de chapa soldada, con alas de 300mm de ancho y 16mm de espesor, y alma de 10mm de espesor. La portacremallera apoya sobre ménsulas de 50mm de espesor proyectadas desde el extremo inferior de los tabiques. En la envuelta exterior se dispone además un anillo de 16mm de espesor a nivel del eje horizontal de la viga para distribución de la carga horizontal de mando.

El eje central del carousel está compuesto por un cilindro hueco exterior de 4,70m de altura y 914 mm de diámetro, de 25mm de espesor. Los extremos del eje se rematan mediante pernos macizos. El perno superior es de acero F-36 de 254 mm de diámetro, y apoya lateralmente en el rodamiento superior. El perno inferior es de acero F-24 de 965mm de diámetro, y apoya vertical y lateralmente sobre el rodamiento (crapodina) inferior.

El eje recibe los esfuerzos resultantes de las barras de vinculación. Dichas uniones se ubican lo más cerca posible de los rodamientos de apoyo del eje de modo de minimizar la flexión vertical debida a las resultantes horizontales. La inclinación adoptada para las distintas barras permite que la la mayor parte de la carga de vertical de carousel se transfiera directamente al apoyo inferior del eje, de modo de minimizar los esfuerzos axiales de compresión en el eje cilíndrico.

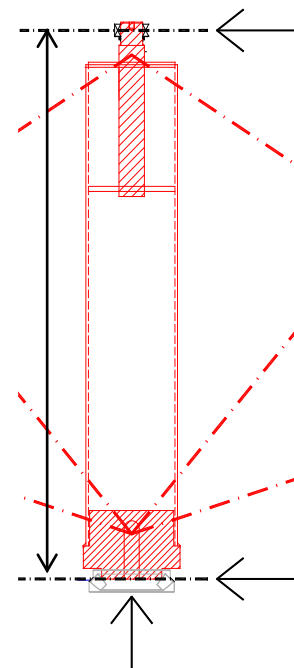


Figura 12 – Eje del Carousel. Apoyos.

### 2.3. Vinculación entre el carousel y la carcasa

Según requerimientos del comitente, las uniones entre los soportes de los rodamientos del carousel y la carcasa fija deben proyectarse abulonadas y fácilmente desmontables para permitir el acceso a los mismos para su mantenimiento y eventual reemplazo. Dichas uniones deben resultar a la vez perfectamente herméticas durante la operación del extractor para evitar fugas.

El soporte lateral del rodamiento superior del eje se vincula a la chapa central de la cubierta plana de la carcasa mediante un arreglo circunferencial de 16 bulones M30 de calidad ASTM A325.

Dado que el plano de apoyo del eje del carousel sobre el rodamiento se encuentra a una altura de 35cm por encima del plano de unión a la cubierta, la unión abulonada debe proyectarse a corte horizontal y flexión vertical.

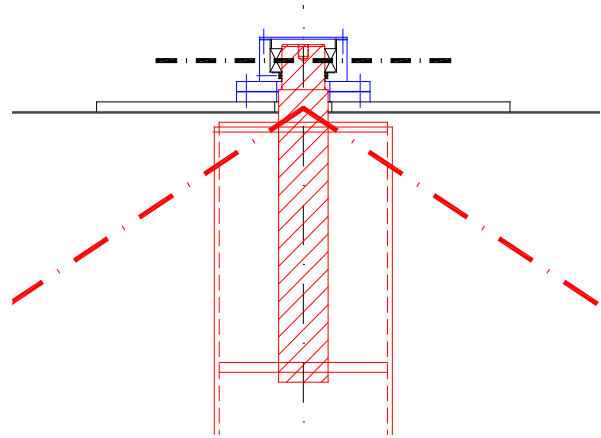


Figura 13 – Soporte del rodamiento superior y unión a cubierta.

También, de acuerdo a lo requerido, la crapodina de apoyo inferior del eje del carousel debe apoyarse sobre un dispositivo que pueda ser retirado para su mantenimiento o reemplazo. Este dispositivo queda suspendido de la estructura fija por lo cual su unión estará sometida a acciones de flexión por traslado de la fuerza horizontal en una altura de 55cm, corte debido a la misma fuerza y una importante tracción en los bulones debida a la total de la carga vertical del carousel. La unión se proyectó con 56 bulones M30 de calidad ASTM A325.

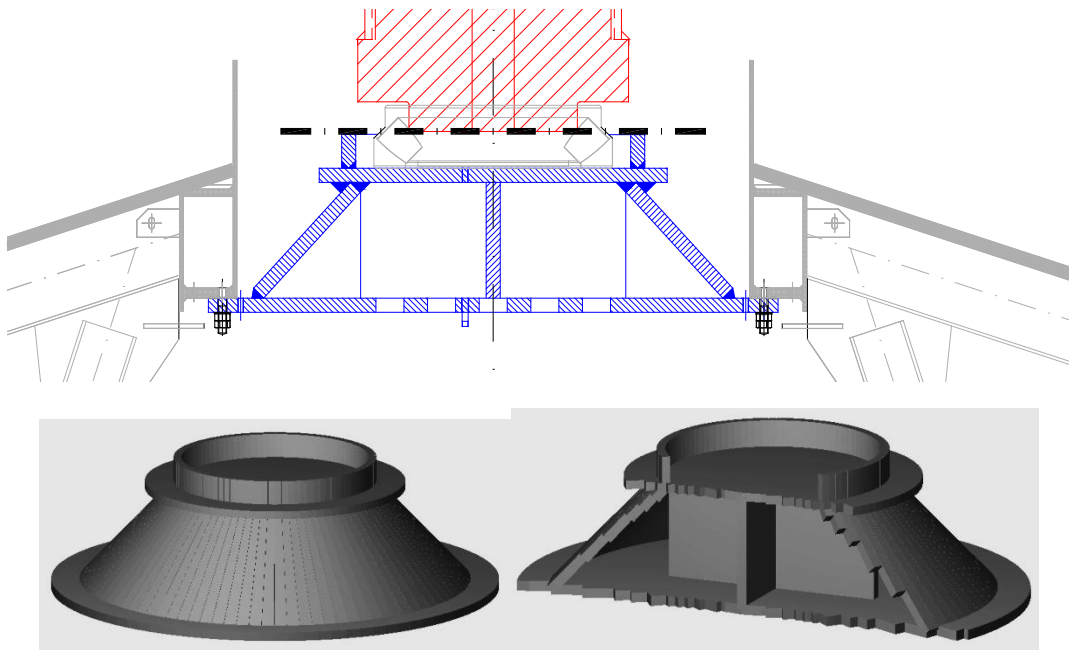
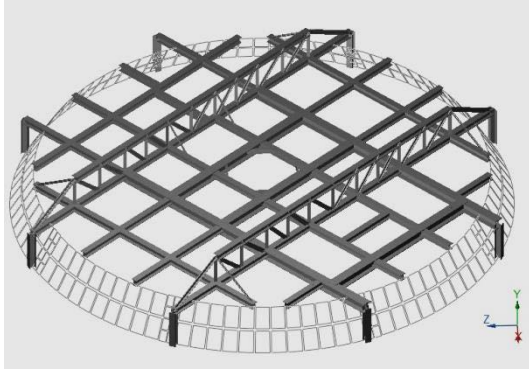


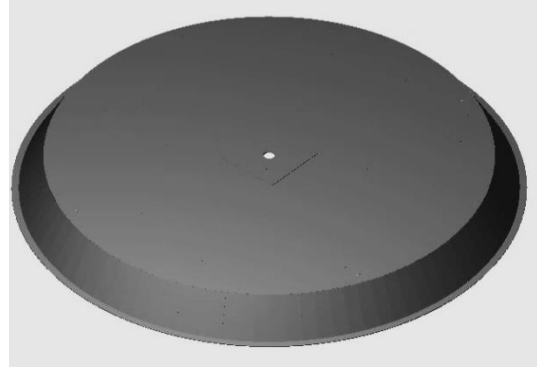
Figura 14 – Detalle del soporte de crapodina inferior.

## 2.4. La carcasa fija

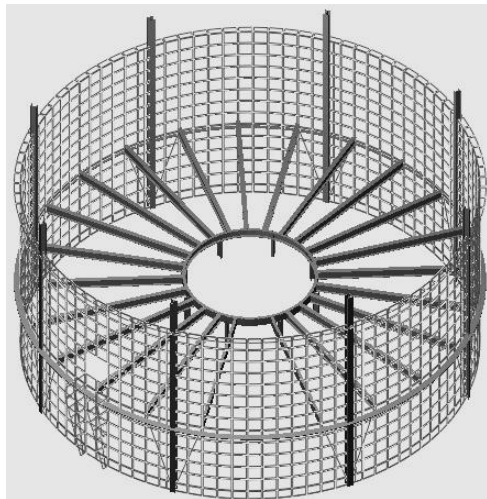
La carcasa exterior está compuesta por una cubierta de chapa reforzada mediante un sistema de vigas principales y secundarias, una envuelta cilíndrica también reforzada mediante 8 nervios verticales perimetrales y un fondo troncocónico que cuenta con un arreglo de vigas reticuladas radiales, interrumpido en el sector de tolva de descarga. En su interior se dispone el sistema de piso filtrante con sus vigas de soporte y en su exterior se ubica el equipo motriz montado sobre un soporte.



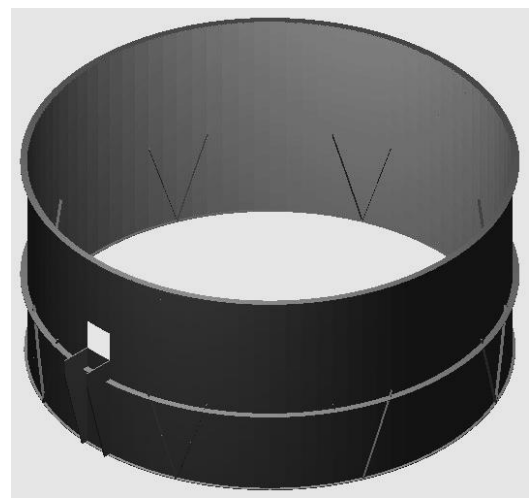
*Figura 15 – Vigas de cubierta principales, secundarias y auxiliares.*



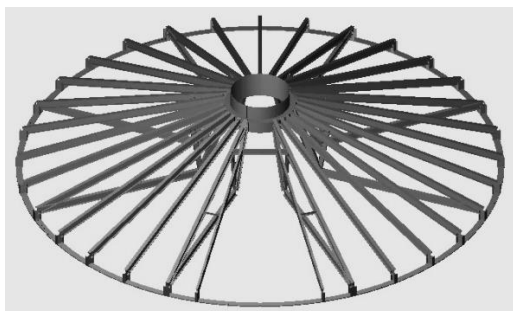
*Figura 16 – Chapas de cubierta plana y transición troncocónica.*



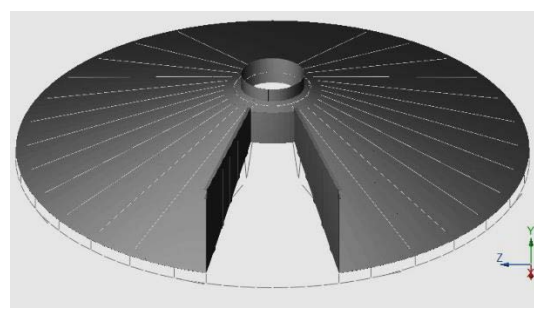
*Figura 17 – Nervios verticales y vigas soporte de piso filtrante.*



*Figura 18 – Envuelta lateral y soporte del equipo motriz.*



*Figura 19 – Vigas radiales inferiores y anillo de apoyo del eje del carousel.*



*Figura 20 – Fondo troncocónico y chapas de contención en tolva.*

La chapa de cubierta está compuesta por una chapa plana de 6,70m de radio y 6mm de espesor. En el sector central, en coincidencia con el apoyo del rodamiento superior del carousel, el espesor de la chapa se aumenta a 50mm para resistir la introducción de los esfuerzos de los bulones de unión del soporte del rodamiento. En el borde perimetral se dispone una chapa troncocónica de transición entre la cubierta plana y la envuelta cilíndrica de la carcasa, de 10mm de espesor y generatrices a 60°. Según requerimientos del comitente, para evitar la corrosión por exposición a los gases producto del proceso de extracción, todas las chapas que conforman la cubierta deben fabricarse con acero inoxidable AISI 304.

El sistema de vigas de cubierta está compuesto por dos vigas principales reticuladas, dos vigas secundarias de alma llena y un entramado de vigas auxiliares para rigidización de la chapa plana de cubierta. Tanto las vigas principales como las secundarias apoyan en sus extremos perimetrales sobre prolongaciones de los nervios de la envuelta, mientras que las vigas auxiliares apoyan sobre la transición troncocónica de la chapa de cubierta. Las vigas principales tienen 13,80m de luz y 1,00m de altura a sistema, adoptándose cordones de sección HE 200 B y diagonalizado con perfiles angulares dispuestos en cruz. Las vigas secundarias apoyan interiormente sobre las vigas principales, resultando así un tramo central de 5,72m y dos tramos extremos de 4,04m de longitud. Para las mismas se adoptan perfiles de sección HE 300 B. Para las vigas auxiliares se adoptan perfiles HE 200 B en general y HE 320 B en el sector de apoyo de equipos.

La envuelta exterior está compuesta por un cilindro vertical de chapa de 7,50m de radio, 7,00m de altura y 10mm de espesor, reforzado mediante tres niveles de anillos horizontales exteriores de 25mm de espesor, ubicados en el extremo superior e inferior y a nivel de las vigas de soporte del piso filtrante. Los 8 nervios verticales se disponen por fuera de la envuelta, soldados a la misma en toda la altura de la envuelta y proyectándose 1,20m por encima de ésta hasta el nivel de cubierta plana. Dichos nervios se diseñan apoyados en su extremo inferior en dirección vertical y tangencial a la envuelta exterior, adoptándose para los mismos perfiles de sección HE 200 B. La envuelta se refuerza también mediante flejes de 200x25 dispuestos en V desde el extremo inferior de cada nervio hasta el anillo intermedio.

Según datos del comitente, el piso filtrante tiene una estructura propia rígida en su plano y un peso propio de 2 kN/m<sup>2</sup>. El piso se interrumpe en un barrido angular de 30° sobre el sector de la tolva de descarga. La estructura de soporte del piso está compuesta por 23 vigas radiales dispuestas con un paso angular de 15° y una longitud propia de 5,30m. Las vigas, de sección IPE300 y UPN300 en el borde de tolva, apoyan directamente sobre la envuelta en su extremo exterior, siendo su extremo interior soportado por una viga anular UPN300. Esta apoya a su vez sobre 8 ménsulas, proyectadas desde puntales verticales IPE 180 de 1,00m de altura, que descargan sobre las vigas principales del fondo.

El fondo troncocónico es de chapa de 6mm de espesor, con generatrices a 18°.

Para soporte de las cargas del eje y las del interior de la carcasa se disponen 8 vigas reticuladas radialmente dispuestas en coincidencia con los nervios verticales exteriores. Ver configuración en Figura 3. Estas vigas apoyan a su vez en sus dos extremos, el exterior en coincidencia de los nervios y el interior en apoyos articulados independientes. Los apoyos externos no restringen los desplazamientos radiales para permitir la libre dilatación.

### 3. FUNCIONAMIENTO DEL EXTRACTOR

#### 3.1. Descripción del proceso

Según requerimientos del proceso de extracción, el carousel debe girar alrededor de su eje vertical, en este caso, en sentido antihorario, a razón de una vuelta completa cada 40 minutos, manteniendo su velocidad angular constante durante todas las etapas de operación. Los tabiques divisorios del carousel, unidos por sus bordes a la corona, giran solidarios a la misma sin rozar el piso filtrante inferior fijo a la carcasa.

El producto a procesar ingresa al extractor en forma continua a través de la boca de carga ubicada en la cubierta, comenzando a llenar el recinto del carousel que se encuentre situado bajo la boca.

El caudal de producto ingresante es tal que, para la velocidad de giro especificada del carousel y el barrido angular requerido de sus compartimientos ( $13.33^\circ$ ), al abandonar la zona de carga el recinto contiene una altura de 3500mm de producto por encima del piso filtrante inferior. Teniendo en cuenta las dimensiones interiores de los recintos, esta altura corresponde a un volumen de  $15,77\text{m}^3$  de producto por recinto cargado.

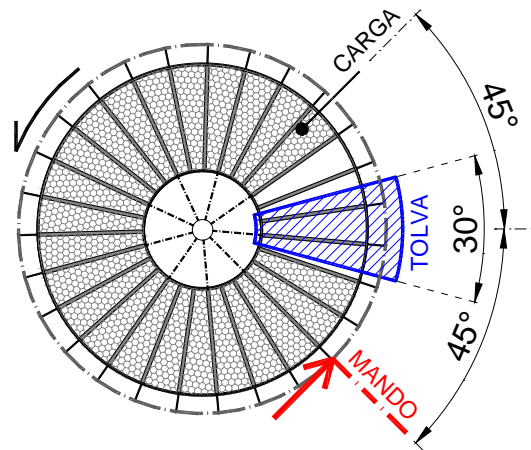


Figura 21 – Carousel. Vista superior. Boca de carga, tolva de descarga y punto de aplicación de fuerza motriz.

Adyacente a la boca de carga, de la cubierta se suspenden 13 regadores, con una separación angular similar a la de los tabiques del carousel. Los regadores vierten el hexano solvente sobre los recintos cargados, el cual drena a través de la altura de producto diluyendo su contenido graso. La micela, constituida por el solvente y los aceites en dilución, filtra a través del piso drenante hasta el fondo troncocónico, donde es recogida y conducida fuera del extractor para efectuar la separación del solvente del aceite obtenido. Luego de completado un giro de aproximadamente  $300^\circ$  desde el punto de carga, la materia sólida remanente en los recintos del carousel llega al sector de la tolva de descarga, sobre la cual el piso de rejilla se encuentra interumpido para permitir la caída del producto sobre la tolva. Los sólidos recolectados son transportados fuera del extractor para recibir un tratamiento de desolventización. Estos sólidos, de alto valor alimentario, son utilizados mayormente para el alimento de animales.

Teniendo en cuenta la apertura angular horizontal requerida para la tolva de descarga ( $30^\circ$ ), el ángulo entre el eje de la tolva y el punto de carga de producto ( $45^\circ$ ), y el ángulo barrido resultante por recinto ( $13.33^\circ$ ), resulta un máximo de 23 recintos llenos de producto durante la operación del extractor en régimen.

#### 3.2. Acción de la fuerza motriz

Para que un recinto cargado siga su recorrido alrededor del eje del carousel, su tabique posterior debe empujar en forma continua al producto, que fricciona dinámicamente al deslizar sobre el piso drenante fijo. Dado que los tabiques están

fijos a la corona, basta aplicar a la misma un torque externo alrededor de su eje central para producir el empuje tangencial requerido. Para que la velocidad angular resultante del carousel se mantenga constante, es preciso que el torque aplicado equilibre en todo momento el correspondiente a la fricción del producto. Según se desprende de la información provista por el comitente, el torque exterior necesario es de 63 kNm por cada recinto cargado, y se suministra por acción de una fuerza horizontal tangencial aplicada por engranaje continuo del piñón de mando sobre la cremallera perimetral del carousel.

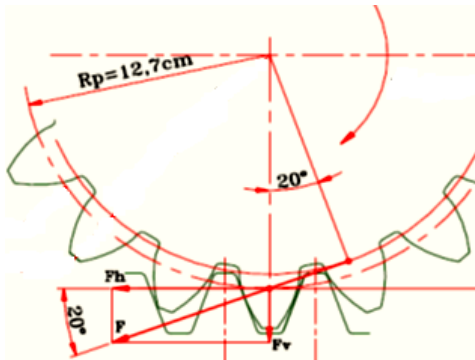


Figura 22 – Engranaje del piñón motriz y la cremallera perimetral del carousel. Fuerzas aplicadas.

La fuerza horizontal tangencial aplicada por el piñón de mando sobre la cremallera perimetral del carousel, con un brazo de 7201mm, resulta de 8,74 kN por recinto cargado. Dado que los dientes del engranaje presentan un ángulo de contacto de 20°, la aplicación de la carga horizontal requerida trae aparejada la aplicación simultánea de una fuerza vertical hacia abajo del 36,4% de aquella (3,18 kN por recinto cargado). Para la operación en régimen, el torque externo resulta de 1449 kNm, y las correspondientes fuerzas aplicadas sobre la cremallera son de 201 kN horizontal tangencial y 73 kN vertical.

Además debe tenerse en consideración la posibilidad del bloqueo del equipo motriz ante un evento extraordinario que detenga el giro del carousel lo que representa un sobre esfuerzo en el piñón del 150%.

#### 4. ACCIONES DE OPERACIÓN DEL EXTRACTOR

##### 4.1. Acción del peso propio del producto contenido en los recintos (P).

Según requerimientos del comitente se consideró un peso específico de producto en proceso de 8 kN/m<sup>3</sup>, resultando un peso de 126 kN de producto por recinto cargado. Este peso ejerce tres tipos de acciones estacionarias sobre las superficies que limitan al recinto: una presión vertical sobre el piso de rejilla inferior, una fuerza de adherencia vertical sobre las caras internas de los tabiques correspondientes, y una presión horizontal de empuje sobre la superficie lateral del recinto.

La presión horizontal de empuje activo se modeló según la teoría de Rankine con un coeficiente de empuje activo de 0,33, obteniéndose una distribución linealmente variable en altura con un máximo de 9,33 kN/m<sup>2</sup> a nivel del piso filtrante. Esta presión actúa sobre la superficie cerrada compuesta por las porciones de envuelta interior y exterior de la corona del carousel y las caras internas de los tabiques que limitan al recinto. Siendo un estado de tipo hidrostático, el empuje activo sobre un recinto no produce acciones a nivel global. En los tabiques que separan dos recintos cargados, las caras individuales están sometidas a flexión entre los refuerzos internos del panel. Los tabiques que separan un recinto cargado de uno vacío deben resistir además la flexión global debida al empuje del lado cargado.

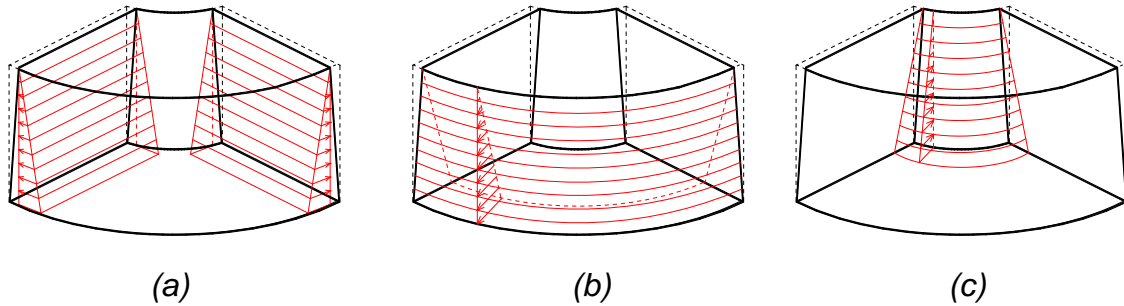


Figura 23. *Peso propio del producto. Diagramas de empuje horizontal en un recinto.*  
 (a) *Caras Internas de tabiques* (b) *Corona, Env.exterior* (c) *Corona, Env.interior.*

La adherencia del producto a las caras de los tabiques divisorios del carousel es un fenómeno observado en base a relevamiento de extractores en operación. Debido al ancho reducido de los recintos y a las características del producto, parte del volumen contenido en los recintos se “cuelga” de los tabiques, apoyando el resto sobre el piso de rejilla. Según requerimientos del comitente, se consideraron dos situaciones límites: adherencia a los tabiques del 66% del peso de producto contenido en cada recinto, con el producto restante apoyando sobre la rejilla inferior, y adherencia del 0%, con 100% del producto apoyado sobre el piso filtrante de la carcasa. La acción del producto adherido a las caras internas de los tabiques del carousel se modela como una carga superficial vertical aplicada sobre las mismas, mientras que la acción del producto apoyado sobre el piso filtrante se modela como una carga superficial uniforme bajo la huella del recinto correspondiente.

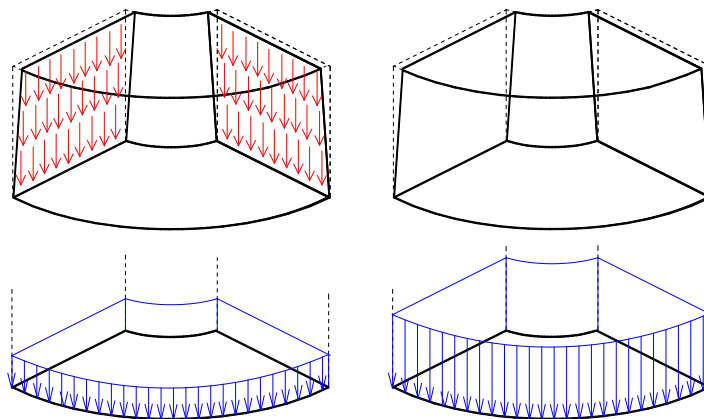


Figura 24. *Acción vertical del peso propio del producto.*  
 (a) *Adherencia 66% a tabiques, Descarga 34% sobre piso.*  
 (b) *Sin adherencia, descarga 100% del producto sobre piso.*

Los tabiques deben ser capaces de soportar la flexión y el corte resultante de esta carga vertical adicional, atendiendo a las distintas condiciones de rigidez de sus vínculos. Los tabiques no conectados directamente al eje central del carousel cuentan con apoyos elásticos radiales en los anillos superiores e inferiores de la envuelta interior de la corona, y descargan verticalmente sobre sus bordes, apoyados elásticamente a las envoltas interior y exterior de la corona. La envuelta interior cuenta con apoyos verticales de gran rigidez en coincidencia con los nudos

del sistema de barras de vinculación, mientras que la envuelta exterior resulta un apoyo de menor rigidez, al hacerlo sobre los tabiques conectados directamente al eje central del carousel. Estos tabiques funcionan como ménsulas con apoyos de gran rigidez radial y vertical en las barras de vinculación, debiendo transportar la reacción de apoyo de la envuelta exterior y la resultante del peso de producto adherido a sus propias caras. El extremo inferior del eje es sometido a una fuerte compresión debida al peso total de producto colgado, y sus extremos deben resistir el corte y la flexión lateral debidas a la excentricidad radial de la carga total.

La carcasa fija debe ser capaz de resistir, además de las reacciones de apoyo de los rodamientos del carousel, la presión vertical del producto apoyado directamente sobre el piso de rejilla filtrante bajo cada recinto cargado. El piso descarga sobre el sistema de vigas radiales que lo soportan, las cuales transportan la carga por flexión y corte verticales como vigas simplemente apoyadas en sus extremos exterior e interior. La reacción exterior se aplica sobre la envuelta de la carcasa, descargando sobre sus nervios y placas base exteriores. La reacción interior se aplica sobre la viga anular interior del sistema de vigas de piso, la cual apoya en puntales verticales alineados con los correspondientes de las vigas reticuladas del cono y descarga así sobre las placas base interiores. Las reacción de apoyo lateral superior del eje del carousel es tomada por los pórticos formados por las vigas reticuladas de cubierta y los nervios sobre los que apoyan. La reacción de apoyo lateral y vertical inferior es transferida al sistema de vigas del cono a través del soporte de la crapodina.

#### 4.2. Acción del peso propio del producto acumulado en la tolva (T)

Según requerimientos del proceso, se consideró un peso de 200 kN de producto acumulado en la tolva de descarga, en cualquier etapa de operación normal del extractor, con un máximo de 400 kN a considerar como condición extraordinaria. Este peso descarga sobre las vigas laterales de la tolva.

#### 4.3. Acción del movimiento giratorio del carousel (M)

Las cargas aplicadas por el piñón de mando sobre la cremallera se transmiten al ala superior de la viga porta cremallera a través de bulones de unión. La componente horizontal, aplicada por encima del nivel del eje de la portacremallera, provoca una flexión adicional a la debida a la componente vertical, más la compresión asociada.

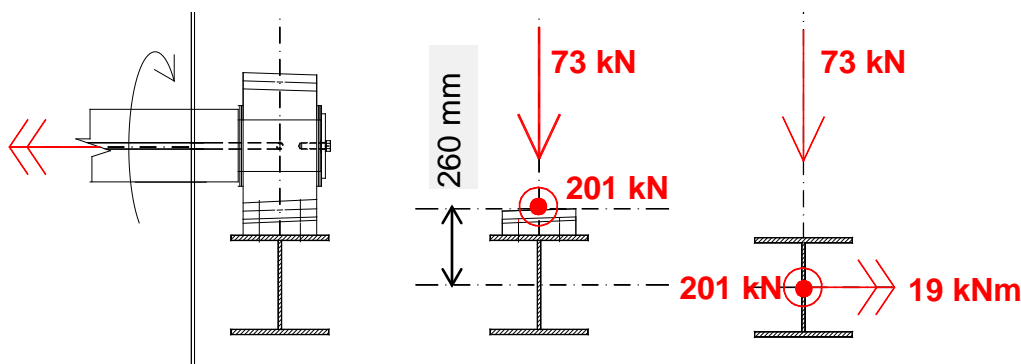
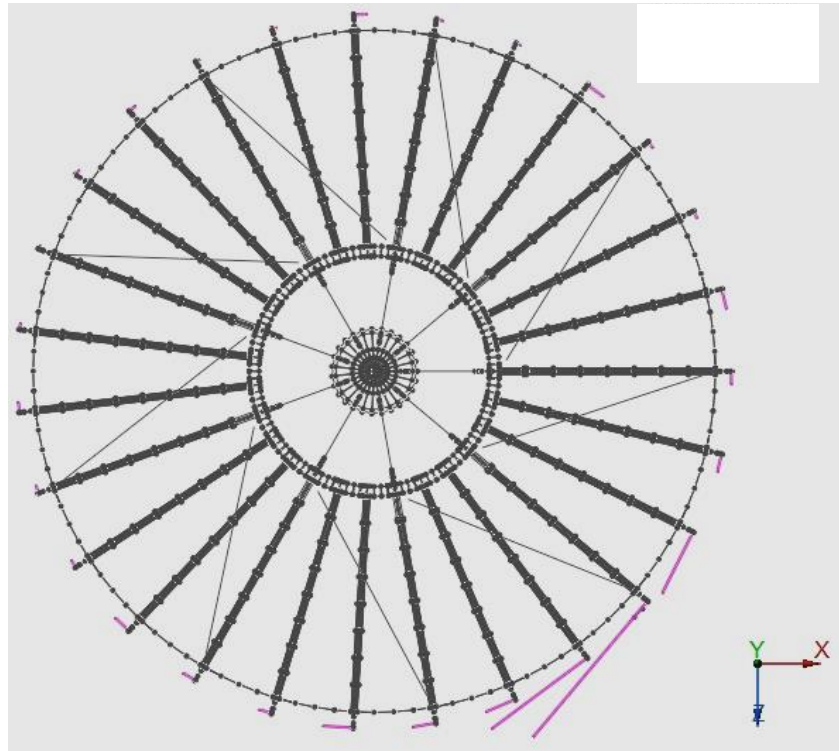
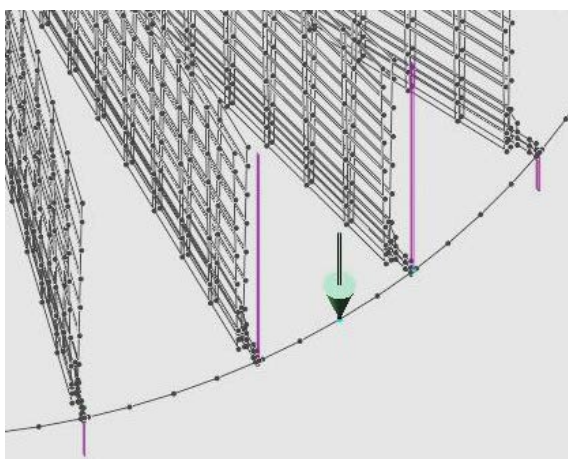


Figura 25 – Aplicación de las fuerzas de mando sobre la viga portacremallera, correspondientes a la operación normal del extractor en régimen.

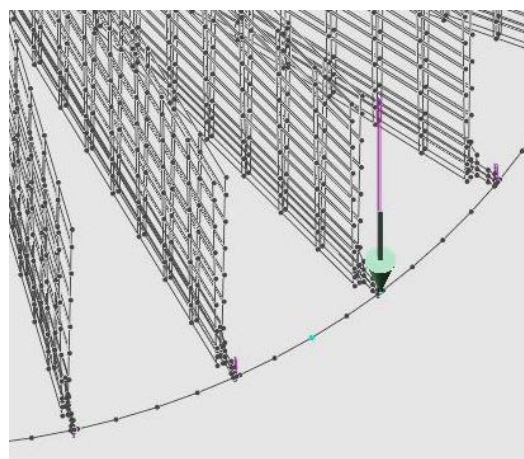
La viga portacremallera transmite las acciones a la envuelta exterior del carousel a través de sus apoyos en las ménsulas verticales proyectadas desde todos los tabiques divisorios. Dada la gran rigidez axial de la viga comparada con la limitada rigidez a flexión horizontal de las ménsulas fuera de su plano, la carga horizontal de mando se distribuye en las ménsulas de varios tabiques. Las cargas verticales se transmiten en forma localizada: cuando el punto de aplicación coincide con un tabique vinculado al eje del carousel, éste recibe el 100% de la carga vertical de mando, mientras que en otro caso la carga se distribuye entre 3 o 4 tabiques.



*Figura 26. Esquematización de la distribución de la fuerza horizontal del piñón entre las ménsulas de apoyo.*



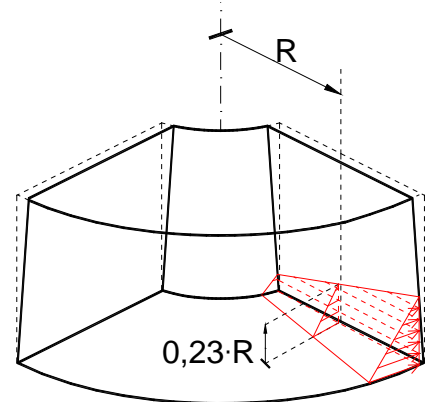
*Figura 27. Carga vertical de mando. Reacciones en ménsulas para piñón de mando aplicado en luz media de v.p.c.*



*Figura 28. Carga vertical de mando. Reacciones en ménsulas para piñón de mando aplicado sobre apoyo de v.p.c..*

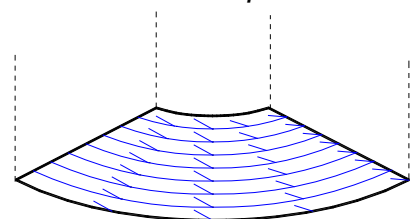
La carga horizontal aplicada en las ménsulas se introduce en la envuelta exterior distribuida a través de sus anillos inferiores, difundándose hacia arriba hasta los anillos superiores. Éstos tiran de los tensores que vinculan a las envueltas entre sí - comprimiendo radialmente el extremo superior de los tabiques vinculados al eje y de esta manera el movimiento giratorio es comunicado a la envuelta interior de modo que la corona gire rígidamente.

Los tabiques, unidos por sus bordes a la corona, giran con ella empujando al producto contenido en los recintos cargados. El momento torsor resultante del empuje del tabique “activo” sobre el producto contenido en un recinto debe ser igual al torque aplicado por la fuerza de mando para vencer la fricción. Este empuje se modeló mediante una distribución proporcional a la distancia radial al eje de giro y a la distancia vertical al piso filtrante, considerando una altura máxima de producto “reactivo” según un ángulo vertical de  $30^\circ$  medido desde el remate inferior del tabique opuesto.



*Figura 29 – Empuje del producto sobre el tabique por fricción contra el piso filtrante.*

La carcasa fija soporta, además de las reacciones de apoyo del eje del basket y la reacción sobre el piñón opuesta a la fuerza de mando aplicada, la fricción del producto sobre el piso de rejilla bajo cada recinto cargado, la cual se modela como una carga superficial horizontal uniforme.



*Figura 30 – Fricción del producto contra el piso filtrante*

#### **4.4. Subpresión interior (S)**

Según requerimientos del proceso, se consideró una subpresión interior de  $2 \text{ kN/m}^2$  para evitar fugas de gas durante la operación normal del equipo, actuante sobre la carcasa fija. Se consideró asimismo como caso extraordinario una subpresión interior de  $3,5 \text{ kN/m}^2$ .

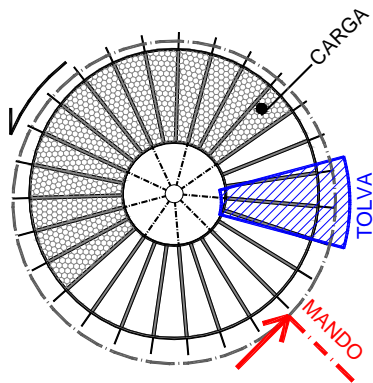
#### **4.5. Condiciones de operación**

A fin de analizar las distintas posiciones del centro de masa de producto cargado respecto de la ubicación del equipo de mando se consideraron, además del estado de operación en régimen, los estados de carga inicial y descarga final:

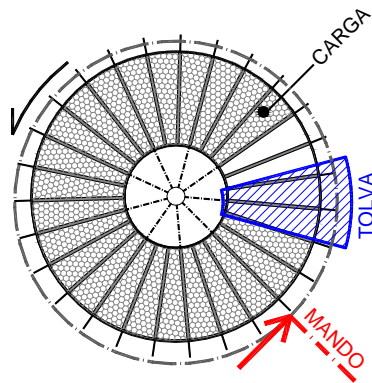
- Op.en Carga – Producto en la mitad de recintos más cercana a pto.carga (14/27).
- Op.Régimen – Producto en la máxima cantidad de recintos en simultáneo (23/27).
- Op.Descarga – Producto en la mitad de recintos más cercana a la tolva (14/27).

Por otra parte, dado que la viga porta cremallera (v.p.c.) apoya sólo en coincidencia con los tabiques, y a que no todos éstos se encuentran vinculados al eje central, para cada una de las etapas de operación se consideraron a su vez tres situaciones posibles para el punto de aplicación de la carga de mando:

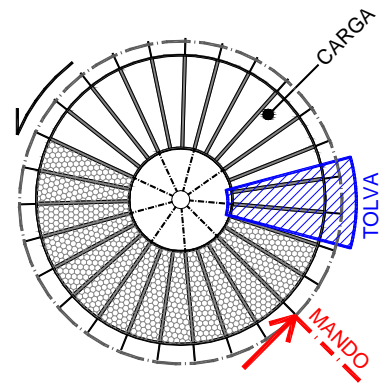
- Posición 1 – Mando s/ apoyo de v.p.c. en panel divisor vinculado al eje central.
- Posición 2 – Mando s/ apoyo de v.p.c. en panel divisor no vinculado al eje central.
- Posición 3 – Mando s/ punto medio de viga porta cremallera e/ apoyos.



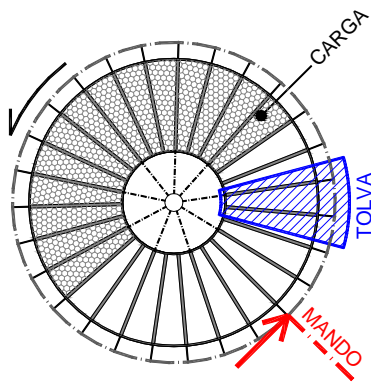
Operación de Carga.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique Vinculado al Eje.



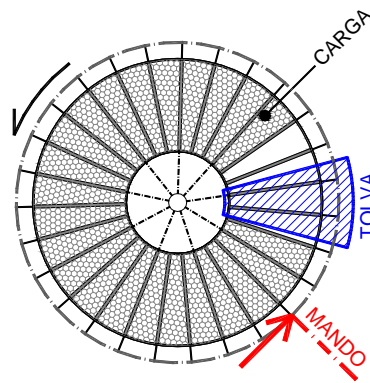
Operación en Régimen.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique Vinculado al Eje.



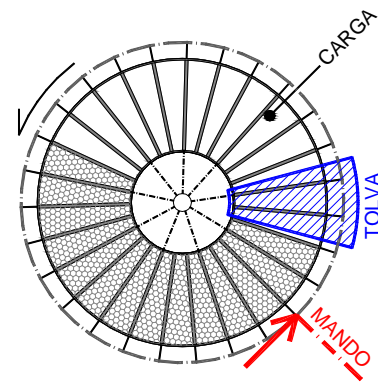
Operación de Descarga.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique Vinculado al Eje.



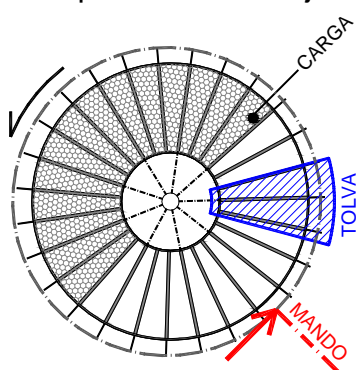
Operación de Carga.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique No Vinc.al Eje.



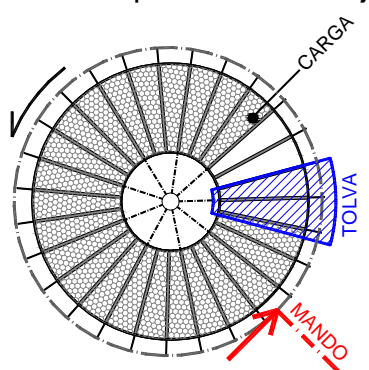
Operación en Régimen.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique No Vinc.al Eje.



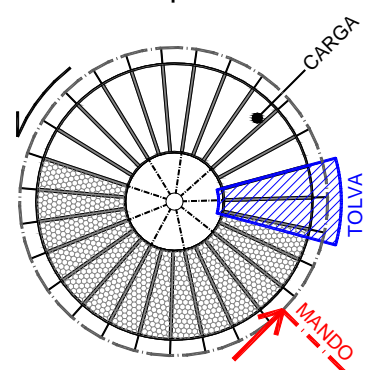
Operación de Descarga.  
Mando s/ Apoyo VPC en  
Tabique No Vinc.al Eje.



Operación de Carga.  
Mando s/ Luz Media  
de VPC entre apoyos.



Operación en Régimen.  
Mando s/ Luz Media  
de VPC entre apoyos.



Operación de Descarga.  
Mando s/ Luz Media  
de VPC entre apoyos.

Figura 31 – Etapas de operación del extractor y posiciones de la carga de mando.

## 5. OTRAS ACCIONES

### 5.1. Acciones permanentes (D)

Los pesos propios de la estructura de acero (chapas y perfiles en general) resultaron de 890 kN para el carousel y 995 kN para la estructura fija, sumando un peso total de 1884 kN. Las cargas permanentes adicionales sobre cada componente se adoptaron según requerimientos del comitente, según se lista a continuación:

PP cremallera perimetral:	58 kN a distribuir sobre viga porta cremallera.
PP rodamiento superior:	10 kN a distribuir en bulones de unión en cubierta.
PP crapodina inferior:	5,40 kN a distribuir bajo huella de crapodina.
PP plataformas y equipos:	6 x 60kN, en puntos prefijados de vigas de cubierta.
PP regadores con solvente:	5kN c/u, en puntos prefijados de chapa de cubierta.
PP piso rejilla permeable:	2kN/m <sup>2</sup> a distribuir sobre vigas radiales de piso.
PP equipos tolva descarga:	100kN total a distribuir sobre vigas laterales de tolva.
PP equipos de mando:	47,65 kN total (piñón+rodamientos+eje+reductor)

### 5.2. Sobrecarga de cubierta (Lr)

Se adoptó una sobrecarga de 1 kN/m<sup>2</sup> distribuida sobre toda la superficie de la chapa plana de cubierta de la carcasa.

### 5.3. Acción sísmica (E)

La acción sísmica se estudió según lo indicado en los reglamentos de aplicación en los sitios de emplazamiento previstos para el extractor: International Building Code (IBC) Ed. 2012, para cálculo de acciones en Decatur, Alabama, EEUU, y Saudi Building Code (SBC) para cálculo de acciones en Arabia Saudita, adoptándose la condición más desfavorable entre ambas locaciones. En base al análisis estático equivalente para la acción sísmica horizontal se obtuvo un coeficiente sísmico de diseño de 0,27 a emplear directamente en las combinaciones de acciones de ASD. Así, para cada masa sísmica  $M=P/g$ , se calculó la acción del sismo en una dirección dada como una fuerza concentrada  $F= 0,27 \times P$  aplicada en el centro de masa correspondiente. Se consideraron las direcciones de acción sísmica paralela y perpendicular al eje de la tolva de descarga.

### 5.4. Acción del viento (W)

No se analizó la acción del viento sobre la estructura del extractor ya que éste no se emplazará a la intemperie y se transportará en bodega cerrada.

### 5.5. Prueba hidráulica del extractor (PH)

Previo a la puesta en operación del extractor se lleva a cabo una prueba hidráulica a fin de asegurar la estanqueidad del fondo de la carcasa, llenando la misma con agua hasta el remate superior del troncocono de fondo, resultando una columna de 2130 mm de agua medidos desde el punto más bajo. El sector inferior de la carcasa debe ser capaz de resistir las presiones hidrostáticas resultantes del empuje del agua.

## 5.6. Explosión accidental del extractor (PE)

Según requerimientos del comitente, se considera una sobrepresión interior extraordinaria de  $7 \text{ kN/m}^2$ , correspondiente a la explosión accidental del extractor.

## 6. COMBINACIONES DE ACCIONES

Según requerimientos del comitente, se consideraron las siguientes combinaciones de acciones y factores de seguridad requeridos para la verificación de la estructura de acuerdo con la especificación ASD.

Combinaciones de Acciones que representan Estados de Servicio:

Op.en Carga, Normal:	$D + Lr + S + T + Pc + Mc_{1/2/3}$	FS = 1,67
Op.en Régimen, Normal:	$D + Lr + S + T + Pr + Mr_{1/2/3}$	FS = 1,67
Op.en Descarga, Normal:	$D + Lr + S + T + Pd + Md_{1/2/3}$	FS = 1,67

Combinaciones de Acciones que representan Estados Últimos:

Prueba Hidráulica del Extractor:	$D+PH$	FS = 1,34
Op.en Régimen durante Explosión:	$D+PE+Pr+Mr$	FS = 1,17
Op.en Régimen c/Máxima SC Tolva:	$D+Lr+2T+S+Pr+Mr$	FS = 1,17
Op.en Régimen c/Máxima Subpresión:	$D+Lr+T+1,75.S+Pr+Mr$	FS = 1,00
Op.en Carga c/Mando Bloqueado:	$D+Lr+T+S+Pc+2,5Mc$	FS = 1,17
Op.en Régimen c/Mando Bloqueado:	$D+Lr+T+S+Pr+2,5Mr$	FS = 1,17
Op.en Descarga c/Mando Bloqueado:	$D+Lr+T+S+Pd+2,5Md$	FS = 1,17
Op.en Régimen durante Sismo s/X:	$D+Lr+T+S+Pr+Mr \pm 0,27EX$	FS = 1,17
Op.en Régimen durante Sismo s/Z:	$D+Lr+T+S+Pr+Mr \pm 0,27EZ$	FS = 1,17

A fin de homologar las tensiones admisibles, considerando que las tensiones son proporcionales a las acciones, se factorizaron las combinaciones en E.L.U. para transformarlas en combinaciones de servicio equivalentes (FS=1,67):

$$\begin{aligned} &0,80 \cdot D + 0,80 \cdot PH \\ &1,00 \cdot D + 1,00 \cdot Pc + 1,00 \cdot Mc + 1,00 \cdot S + 1,00 \cdot T + 1,00 \cdot Lr \\ &1,00 \cdot D + 1,00 \cdot Pr + 1,00 \cdot Mr + 1,00 \cdot S + 1,00 \cdot T + 1,00 \cdot Lr \\ &1,00 \cdot D + 1,00 \cdot Pd + 1,00 \cdot Md + 1,00 \cdot S + 1,00 \cdot T + 1,00 \cdot Lr \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pr + 0,70 \cdot Mr + 0,70 \cdot S + 1,40 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \\ &0,60 \cdot D + 0,60 \cdot Pr + 0,60 \cdot Mr + 1,05 \cdot S + 0,60 \cdot T + 0,60 \cdot Lr \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pc + 1,40 \cdot Mc + 0,70 \cdot S + 0,70 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pr + 1,40 \cdot Mr + 0,70 \cdot S + 0,70 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pd + 1,40 \cdot Md + 0,70 \cdot S + 0,70 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pr + 0,70 \cdot Mr + 0,70 \cdot S + 0,70 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \pm 0,19 \cdot EX \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pr + 0,70 \cdot Mr + 0,70 \cdot S + 0,70 \cdot T + 0,70 \cdot Lr \pm 0,19 \cdot EZ \\ &0,70 \cdot D + 0,70 \cdot Pr + 0,70 \cdot Mr + 0,70 \cdot PE \end{aligned}$$

## 7. VERIFICACIÓN DE RESISTENCIA

Según la Especificación AISC ASD, se verificó que las tensiones equivalentes de Von Mises resultantes en los elementos de chapa no superen el valor de la tensión admisible a tracción en estado de servicio  $F_y/1,67 = 240\text{MPa}/1,67 = 144 \text{ N/mm}^2$ .

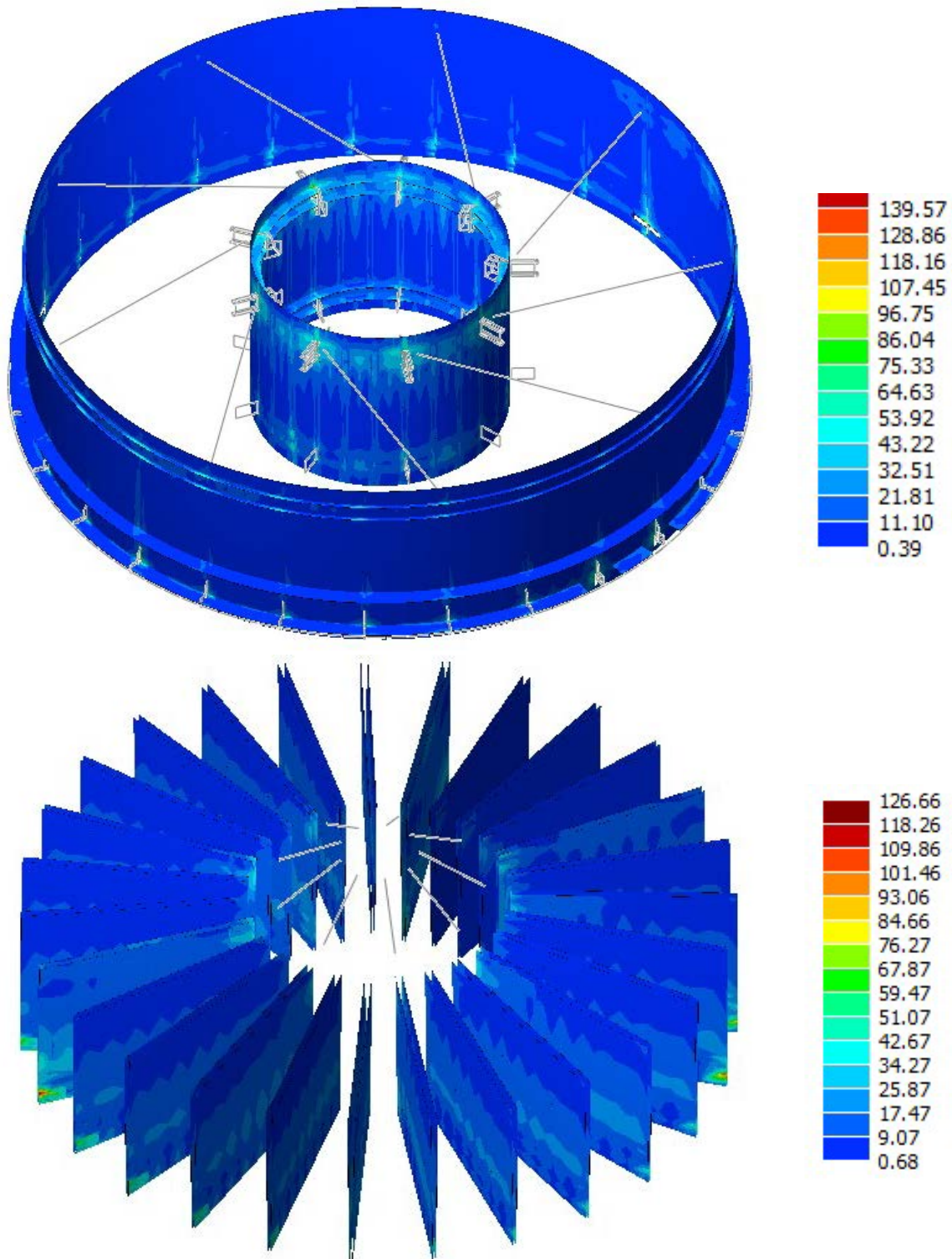


Figura 32 – Tensiones equivalentes de Von Mises ( $\text{N/mm}^2$ ).  
Diagramas envolventes para las componentes del carousel.

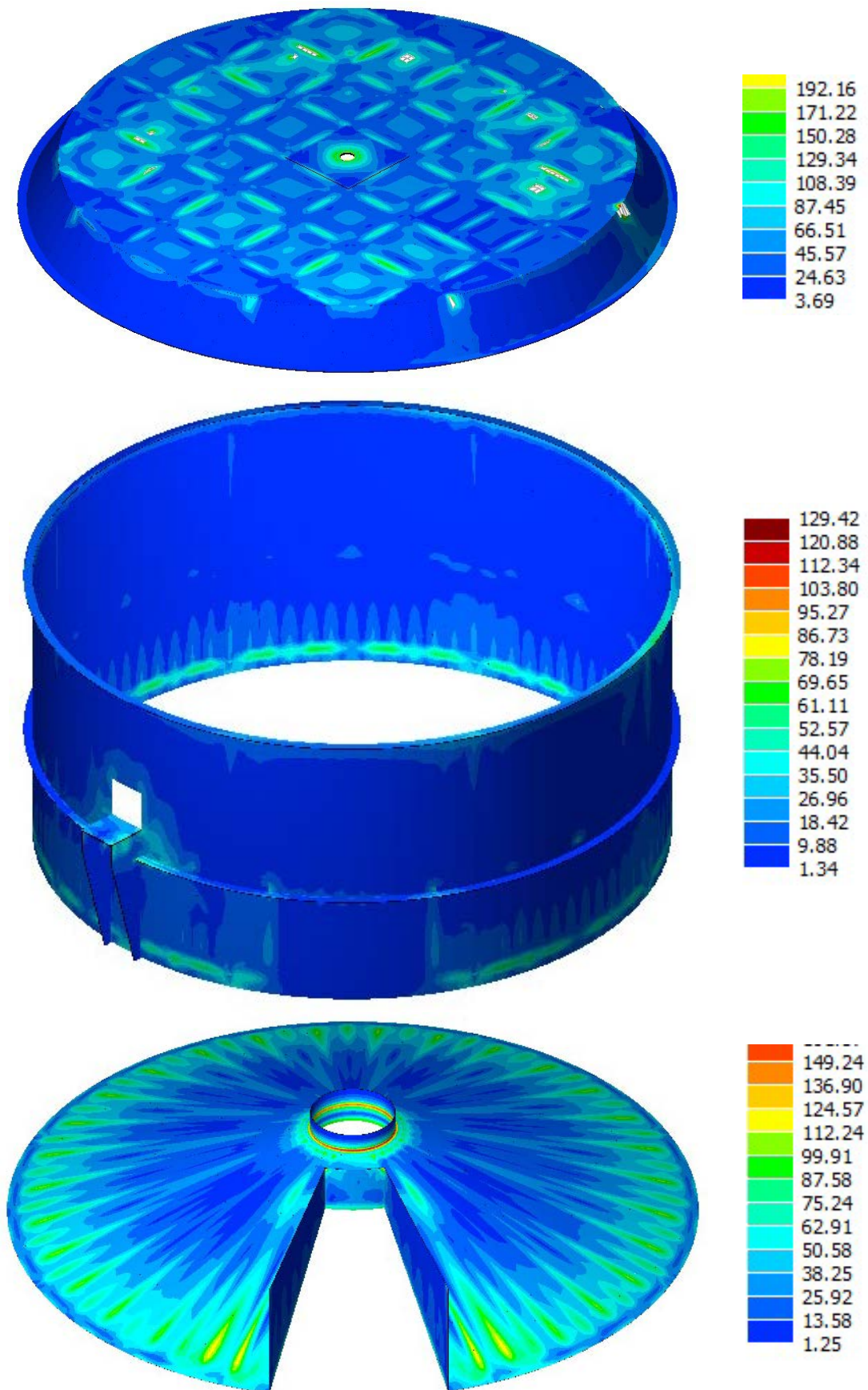
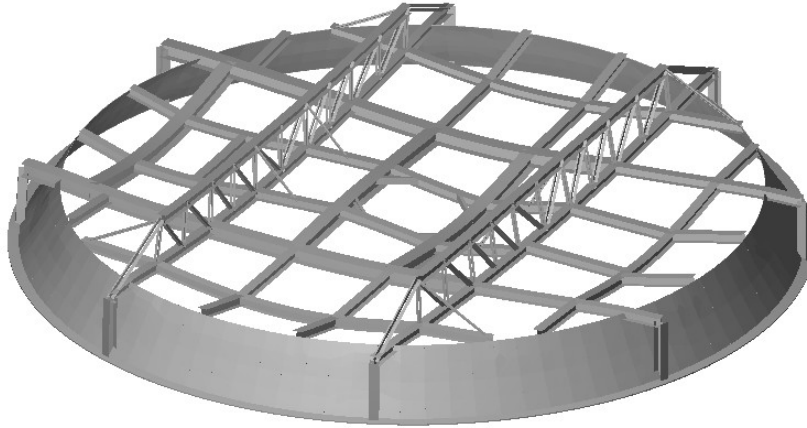


Figura 33 – Tensiones equivalentes de Von Mises ( $N/mm^2$ ).  
 Diagramas envolventes para las componentes de la carcasa fija.

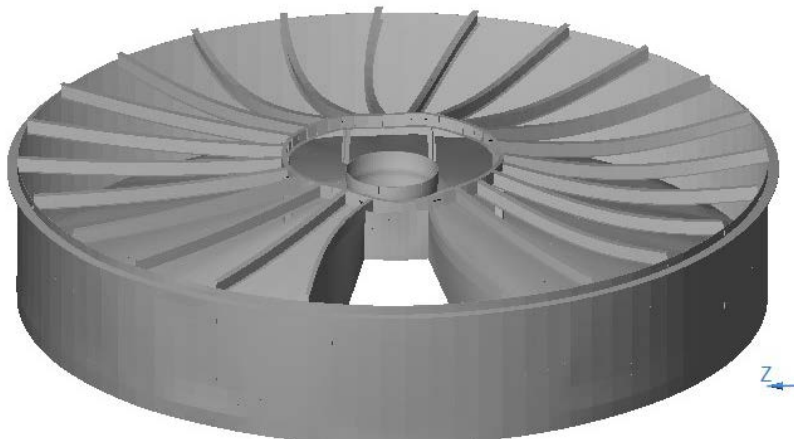
## 8. VERIFICACIÓN DE DEFORMACIONES

Según requerimientos del comitente, la deformación vertical del sistema de vigas de cubierta se debió limitar a una flecha máxima de  $1/500$  a fin de asegurar el gálibo vertical mínimo requerido entre el remate superior de los tabiques del carousel giratorio y los regadores de solvente y la boca de carga, fijos a la cubierta. Las deformaciones de la cubierta inducen a su vez distorsiones y asentamientos diferenciales en las plataformas de equipos dispuestos sobre la misma, y pueden afectar el correcto funcionamiento del rodamiento superior del carousel.



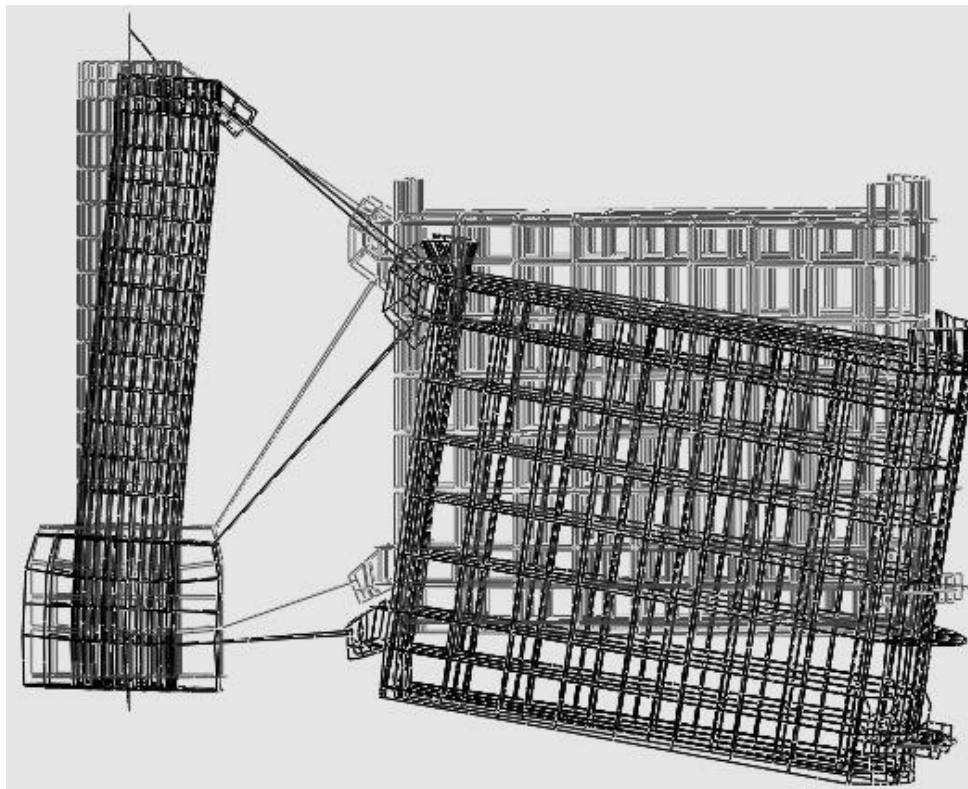
*Figura 34 – Deformación del sistema de vigas de cubierta.  
Extractor en Operación Normal de Descarga. Escala x30.*

Es preciso también limitar la deformación vertical del sistemas de vigas de soporte del piso de rejilla filtrante, para evitar escape de producto por debajo del remate inferior de los tabiques divisorios del carousel. Según requerimientos del comitente, se verificó que la flecha vertical de las vigas no superase una deflexión  $1/500$  ( ) durante la operación normal del extractor, considerando el 100% del producto apoyando sobre la rejilla.



*Figura 35 – Deformación del sistema de vigas de piso filtrante.  
Extractor en Operación Normal en Régimen. Escala x50.*

Para asegurar un adecuado engranaje entre la cremallera del carousel y el piñón del equipo motriz aplicado por encima de ésta, es preciso limitar la deformación vertical de la viga de soporte de la cremallera. El desplazamiento vertical total de la viga es producto de la deformación propia de la viga respecto de la línea de cierre de sus apoyos, y del desplazamiento vertical total de éstos. La deformación propia de la viga es despreciable debido a la gran inercia de la sección adoptada y la reducida luz resultante entre apoyos. El desplazamiento de los apoyos resulta de la pequeña deformación propia de las chapas verticales de las ménsulas respecto de los tabiques, la deformación propia de los tabiques como ménsulas empotradas en los anillos superiores e inferiores de la envuelta interior de la corona, y la inclinación vertical del borde interior de los tabiques debido al alargamiento y acortamiento de las bielas radiales que soportan, respectivamente, al anillo superior e inferior, y a los desplazamientos laterales del eje central. Según indicaciones del comitente, las deformaciones de los apoyos debidas al peso propio de la estructura del carousel serán corregidas durante la operación de montaje de la viga porta-cremallera, para lo cual la deformación correspondiente no deberá superar 1/500. Así, durante la operación del extractor se especificó una flecha máxima admisible de 6 mm debida únicamente a la acción del peso del producto cargado.



*Figura 36 – Deformación de un módulo del carousel.  
Extractor en Operación Normal de Descarga. Escala x250.*