



Universidad
Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Diseño, cálculo y optimización de un
semirremolque con cisterna criogénica

Design, calculation and optimization of a cryogenic
tank semitrailer

Autor:

Joseba Dehesa Vicén

Directores:

Dr. D. Luis Castejón Herrer
D. Hugo Malón Litago

Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes.
Departamento de Ingeniería Mecánica.

Escuela de ingeniería y arquitectura

Noviembre 2016

Diseño, cálculo y optimización de un semirremolque con cisterna criogénica

RESUMEN

En este proyecto se diseña, calcula y optimiza un chasis de semirremolque con cisterna criogénica.

Para este fin se parte de un modelo geométrico (.step) de un semirremolque convencional de carga tipo chasis plataforma cedido, por el departamento de ingeniería mecánica y se modifica su estructura adecuadamente para implementar sobre sus largueros una cisterna criogénica.

Posteriormente se aplica el método de los elementos finitos para calcular el vehículo frente a diferentes casos de carga.

A la vista de los resultados obtenidos en la primera iteración de cálculo se optimiza el modelo reduciendo elementos sobredimensionados o reforzando puntos críticos y zonas que presentan un coeficiente de seguridad deficiente de forma iterativa hasta alcanzar un vehículo final óptimo.

Por último, se muestran los resultados obtenidos con el modelo final.

ÍNDICE

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1.	DEFINICIÓN.....	5
1.2.	OBJETIVOS Y ALCANCE	6
2.	MATERIALES UTILIZADOS	7
3.	FASE DE DISEÑO	9
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	9
3.2.	ELIMINACIÓN DE COMPONENTES INNECESARIOS.....	9
3.3.	DISEÑO DE LA CISTERNA CRIOGÉNICA.....	10
3.4.	IMPLEMENTACION DE LA CISTERNA EN EL CHASIS	12
4.	PREPROCESO: MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	13
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	13
4.2.	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	13
4.3.	CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	15
4.3.1.	CARGAS DE MODELO	15
4.3.2.	CASO ESTÁTICO.....	16
4.3.3.	CASO DE APOYO EN PATAS	18
4.3.4.	CASO DE FRENADO.....	20
4.3.5.	CASO DE CURVA.....	21
4.3.6.	CASO DE GIRO DE RADIO MÍNIMO.....	22
5.	POSTPROCESO: ANALISIS DE RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN.....	25
5.2.	MODELO INICIAL.....	26
5.3.	MODELO OPTIMIZADO.....	27
5.3.1.	CONSIDERACIONES.....	27
5.3.2.	MODELO OPTIMIZADO	28
5.3.3.	ESTUDIO DE PANDEO	30
5.3.4.	COMPARATIVA MODELO INICIAL Y OPTIMIZADO.....	31
6.	CONCLUSIÓN.....	33
7.	BIBLIOGRAFIA.....	34

ANEXO A: MEDIOS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	A1
A.1 METODOLOGÍAS APLICADAS PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	A2
A.1.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	A2
A.2 SOFTWARE UTILIZADO	A7
A.2.1 MSC. PATRAN 2012.....	A7
A.2.2 ABAQUS.....	A12
A.2.3 ABAQUS VIEWER	A13
ANEXO B: DISEÑO GEOMÉTRICO Y MALLADO DEL MODELO GEOMÉTRICO.....	B1
ANEXO C: ESTRUCTURA DEL SEMIRREMOLQUE. DESPIECE DE COMPONENTES.....	C1
ANEXO D: MATERIALES: CURVA TENSIÓN – DEFORMACIÓN	D1
ANEXO E: RESULTADOS.....	E1
E.1.RESULTADOS MODELO INICIAL	E2
E.1.1 TABLA RESUMEN.....	E2
E.1.2 TENSIONES EQUIVALENTES DE VON MISES POR COMPONENTE.....	E3
E.2 ITERACIONES	E10
E.3 RESULTADOS MODELO FINAL.....	E11
E.3.1DEFORMADA	E11
E.3.2 TABLA RESUMEN	E13
E.3.3 TENSIONES EQUIVALENTES DE VON MISES POR COMPONENTE.....	E14
E.3.4 MODOS DE PANDEO.....	E21

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DEFINICIÓN

En la actualidad el 74,5 % de las mercancías en la Unión Europea se mueven utilizando el transporte por carretera. En España el porcentaje se dispara alcanzando el 94,5 %.

A la vista de estos datos nos podemos hacer una idea de la importancia de los semirremolques en el transporte de mercancías.

El presente proyecto trata de conseguir un modelo óptimo para el transporte de un tipo de mercancía que requiere un transporte especial, los líquidos criogénicos y en concreto el nitrógeno líquido.

El nitrógeno líquido tiene multitud de aplicaciones, su uso es imprescindible en laboratorios, centros de investigación, en el campo de la biología o en medicina para la conservación de pruebas biológicas.

Debido a esta demanda de nitrógeno existe la necesidad de hacerlo llegar a distintos puntos de la geografía, es aquí donde trata de aportar su granito de arena este proyecto, concretamente en el transporte terrestre de nitrógeno líquido en suelo europeo atendiendo a las restricciones de la normativa vigente de la unión europea y tratando de maximizar la carga útil de nitrógeno líquido por semirremolque, reduciendo así la contaminación medioambiental y minimizando los costes de transporte de la mercancía.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo del proyecto es lograr un modelo adecuado de semirremolque que cumpla la normativa europea vigente y tenga en cuenta las peculiaridades de la mercancía a transportar, en este caso el nitrógeno líquido que por su condición criogénica precisa la necesidad de implementar un aislamiento térmico y una presurización adecuadas.

Así pues, el objetivo es conseguir una estructura que cumpla de forma óptima las exigencias mecánicas a las que se ve sometida y que al mismo tiempo realice un aislamiento térmico adecuado.

Para ello se calcula el modelo para diferentes casos de carga mediante el método de los elementos finitos. De forma iterativa se procede a realizar los cambios pertinentes en la dirección adecuada a la vista de los resultados del cálculo redefiniendo aquellas zonas que presenten deficiencias.

De esta manera el alcance del proyecto será conseguir un diseño óptimo, con una configuración mecánica adecuada y una correcta elección de materiales en cada componente, en función de las exigencias mecánicas a las que se vea sometido, buscando un compromiso entre costes de fabricación, peso de la carga útil y prestaciones.

En los siguientes apartados se va a proceder a explicar las diferentes fases del proyecto. En primer lugar, se comentarán las decisiones más importantes en la fase de diseño del modelo. Seguidamente se comentarán los materiales empleados y se presentarán los resultados del cálculo de los modelos inicial y optimizados sometidos a los diferentes casos de carga estudiados y se comentarán las mejoras obtenidas. Por último, se presentará un cálculo del modelo optimizado frente a pandeo, necesario debido a la reducción de espesores realizada en varios componentes.

Se adjuntan una serie de anexos en los que se recoge una explicación de la metodología empleada, una introducción a los programas informáticos utilizados, el diseño geométrico y mallado del modelo detallados en profundidad, los materiales empleados y las gráficas completas de los resultados obtenidos en los diferentes casos de carga para cada modelo.

2. MATERIALES UTILIZADOS

En el presente apartado se describen los materiales empleados en el diseño del semirremolque.

El material empleado para toda la estructura del modelo inicial es el acero s-355, material comúnmente empleado en el diseño de semirremolques.

En el proceso de optimización, con el fin de conseguir un vehículo innovador dotado de unas prestaciones acordes al avance tecnológico de este sector se han implementado en determinados componentes aceros de alta resistencia.

Para este fin se ha utilizado el acero Strenx 700 de la marca SSAB con el que se ha conseguido una estructura más resistente a la vez que una importante reducción del peso del modelo.

A continuación, se muestran las propiedades mecánicas de los aceros empleados:

Acero:	S-355	Strenx 700
Tensión de rotura (MPa)	510	850
Tensión de fluencia (MPa)	355	700
ν	0,3	0,3
E (MPa)	210000	210000
ρ (kg/m ³)	7800	7800

Tabla 1

Como material aislante se ha empleado perlita expandida, se muestra la composición química del material:

COMPOSICIÓN QUÍMICA	
SiO ₂	74% a 79,5%
Al ₂ O ₃	13% a 17%
Fe ₂ O ₃	0,3% a 0,95%
Na ₂ O	2% a 5%
K ₂ O	0,5% a 5%
CaO	0,4% a 0,6%
MgO	0,04% a 0,15%

Tabla 2

Es un material similar a los polímeros en cuanto a comportamiento mecánico, pero con una mayor capacidad aislante.

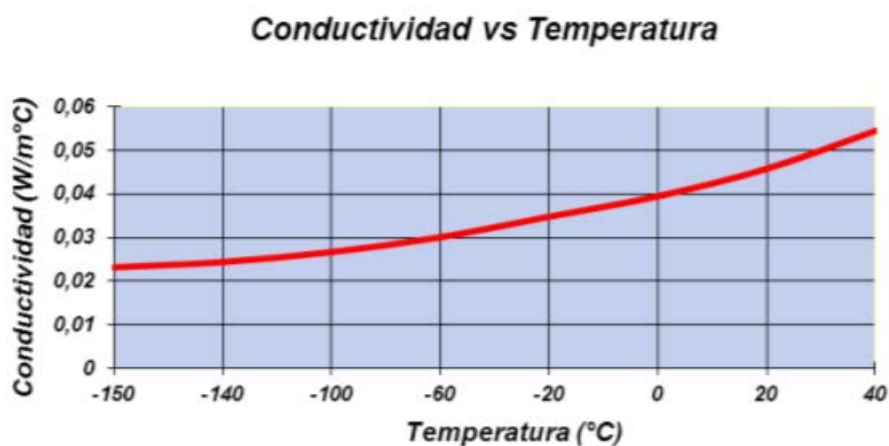


Tabla 3

Por último, se muestran las especificaciones técnicas de la perlita escogida:

	Perlita
Resistencia a compresión (5% def.)	482
ν	0,3
E (Mpa)	1000
ρ (kg/m³)	128

Tabla 4

El material empleado en cada componente de cada uno de los modelos realizados así como sus espesores se pueden observar en el apartado 5.

3. FASE DE DISEÑO

3.1. INTRODUCCIÓN

Se procede a explicar los aspectos más importantes de la primera fase del proyecto, el diseño del modelo criogénico inicial.

Esta fase ha sido la parte más crítica e importante del proyecto debido a que el modelo diseñado no se apoya en ningún vehículo criogénico anterior, sino que se ha realizado un diseño totalmente innovador partiendo del modelo geométrico de un semirremolque convencional de carga cedido por el área de transportes de la universidad de Zaragoza.

3.2. ELIMINACIÓN DE COMPONENTES INNECESARIOS.

Se procede en primer lugar a eliminar los elementos innecesarios para nuestro modelo como son el suelo o los laterales dejando únicamente los elementos estructurales del chasis, la chapa antideslizamiento, la quinta rueda y los soportes de las suspensiones quedando el modelo de la siguiente manera:

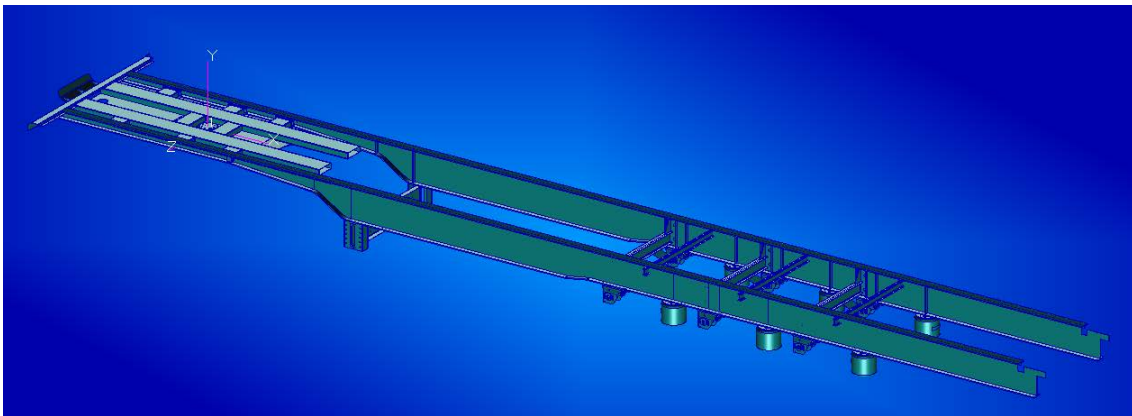


Ilustración 1

3.3. DISEÑO DE LA CISTERNA CRIOGÉNICA

El tanque para transportar el nitrógeno líquido está conformado por dos cisternas de acero de pared delgada separadas por perlita expandida, material que actúa como aislante térmico.

Para una misma presión interna, las tensiones en un cilindro de pared delgada son proporcionales al radio del mismo como se muestra a continuación:

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{e} \text{ (Para un cilindro)}$$

Donde P es la presión interna y e el espesor de la pared.

Por este motivo se ha optado por dotar a la cisterna de la máxima longitud posible, reduciendo así su diámetro para un mismo volumen de carga útil. De esta forma se minimizan las tensiones ocasionadas por la presión hidrostática y la presurización del nitrógeno líquido de forma que se minimiza el espesor de pared necesario para conseguir un modelo lo más ligero posible.

Con el mismo fin de minimizar las tensiones, se realiza el cerramiento del cilindro por ambos lados con sendas semiesferas.

La reducción del diámetro de la cisterna también contribuye a bajar el centro de gravedad del semirremolque mejorando su adherencia a la calzada y aumentando su coeficiente de seguridad frente al vuelco.

Debido a la necesidad de aislamiento térmico de la carga, esta cisterna se recubre con un material aislante embebido a su vez en una segunda cisterna de acero.

Para obtener las dimensiones de la cisterna, en primer lugar se realiza una estimación de los pesos aproximados de cada parte del vehículo.

	PESOS APROXIMADOS(Tm.)
PESO MÁXIMO NORMATIVA	40
CABINA TRACTORA	8
SEMIRREMOLQUE	6
CARGA UTIL	26

Tabla 5

Conocido el peso estimado de carga útil y por tanto su volumen se calcula la geometría de la cisterna, cuyas dimensiones se muestran a continuación.

	Diámetro	Longitud
Cisterna interior	1,98 m	13,4 m
Cisterna exterior	1,88 m	13,5 m

Tabla 6

Resultando un volumen interior de la cisterna de 35.8m³ diseñada para alojar al 90% de su capacidad, 26 Tm. de nitrógeno líquido (32.2m³)

3.4. IMPLEMENTACION DE LA CISTERNA EN EL CHASIS

Una vez conocida la geometría de la cisterna, se comprueba que hay que modificar la forma de los largueros de forma que permitan alojarla sobre ellos sin que exista contacto con ningún otro elemento del chasis.

Si no se realiza esta modificación, la parte baja de la cisterna crearía interferencia con el King-pin, con las vigas de sección cuadrada delanteras y con los travesaños de las suspensiones.

Así pues, se eleva el ala superior de los largueros hasta la cota mínima necesaria para salvar los diferentes elementos del chasis.

Al realizar esta modificación se presentan unos largueros excesivamente sobredimensionados por lo que se reducirán por la zona inferior donde sea posible.

En la zona de los apoyos de la suspensión la cota vendrá marcada por la posición relativa entre el King-pin y los apoyos de la suspensión, de lo que resulta un alma de altura considerable tomando especial importancia los nervios rigidificadores.

Por último, se diseña una llanta superior tangente a la cisterna evitando la concentración de tensiones que generaría un apoyo directo del alma en la pared de la cisterna.

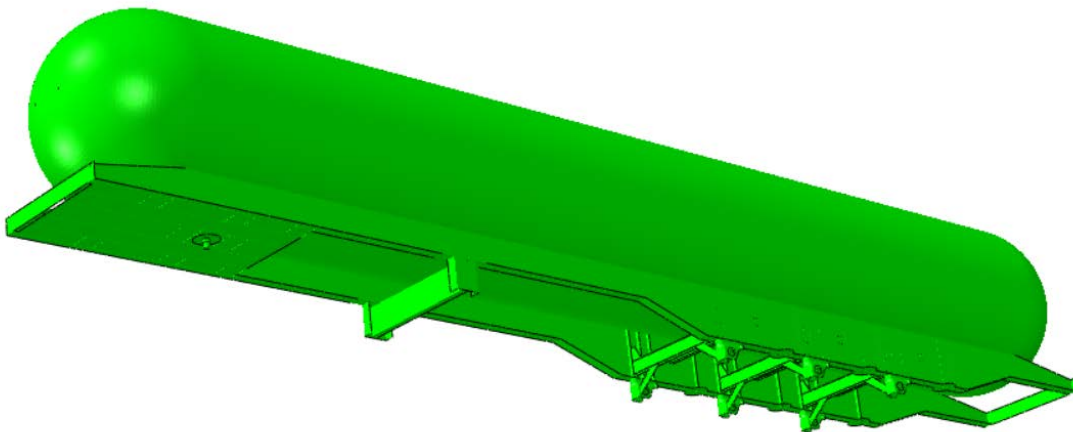


Ilustración 2

Para un análisis en profundidad de la fase de diseño del proyecto acudir al anexo B.

4. PREPROCESO: MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este paso se realiza el modelo de elementos finitos del modelo inicial. Para ello se cuenta con la experiencia del área de ingeniería e infraestructura de los transportes en este ámbito.

Para realizar el modelo de elementos finitos se modela como tipo placa la mayor parte de los elementos del chasis a los que posteriormente se les asignará un espesor.

Se introducen elementos tipo solido en las piezas que por su geometría no pueden ser generadas por elementos tipo Shell como son el King-pin, los bulones de los soportes de la suspensión o los elementos volumétricos generados entre cisternas que conforman el aislante térmico.

Una vez mallado el modelo se introducen las cargas como por ejemplo la presurización de la cisterna, la carga hidrostática generada por el nitrógeno líquido o la aceleración de la gravedad, se simulan el apoyo del King-pin y las suspensiones por elementos tipo muelle y se aplican las condiciones de contorno adecuadas.

Por último, se calcula el modelo para diferentes casuísticas que emularán diferentes situaciones a las que el modelo deberá hacer frente a lo largo de su vida útil para comprobar su resistencia ante ellas.

4.2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El mallado de las superficies se realiza tratando de generar elementos tipo "S4R", es decir, elementos formados por 4 nodos debido a su mejor respuesta en el cálculo frente a elementos de tres nodos "S3R" aunque habrá zonas en las que no sea posible evitar estos elementos.

La malla se realiza con un tamaño de elemento proporcional a la superficie de la pieza, prestándose especial atención a las zonas de unión entre piezas para conseguir unos buenos resultados de cálculo, para un mayor detalle de este proceso acudir al anexo B.

A continuación, puede verse un ejemplo de conexión de la malla de diferentes componentes:

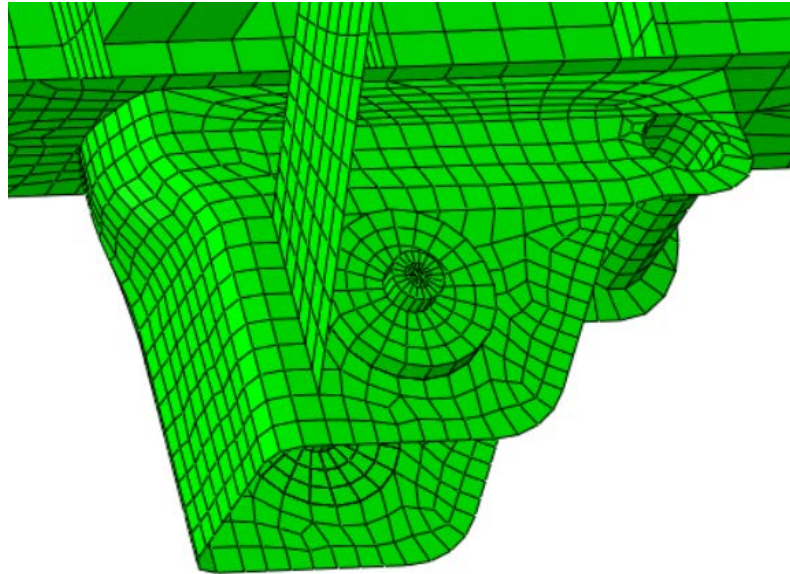


Ilustración 3

Se muestra un resumen de las características de la malla realizada:

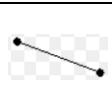
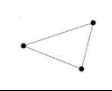
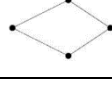
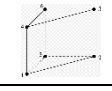
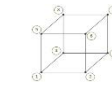
Tipo:			nº elementos
Barra			13
Shell	Tria		24
	Quad		165332
3D	Wedge		1820
	Hex		71616
Total			238795

Tabla 7

4.3. CASOS DE CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO

4.3.1. CARGAS DE MODELO

Para los diferentes casos de carga se van a introducir una serie de cargas comunes a todos ellos y que se proceden a explicar.

En primer lugar, se introducen las cargas a las que se ve sometida la cisterna interior.

En la zona superior de la cisterna se introduce una presión uniforme de 5 atmosferas que simula la presurización de la cisterna y a partir del nivel del nitrógeno líquido se introduce una carga hidrostática que parte de 5 atmosferas en el nivel superior.

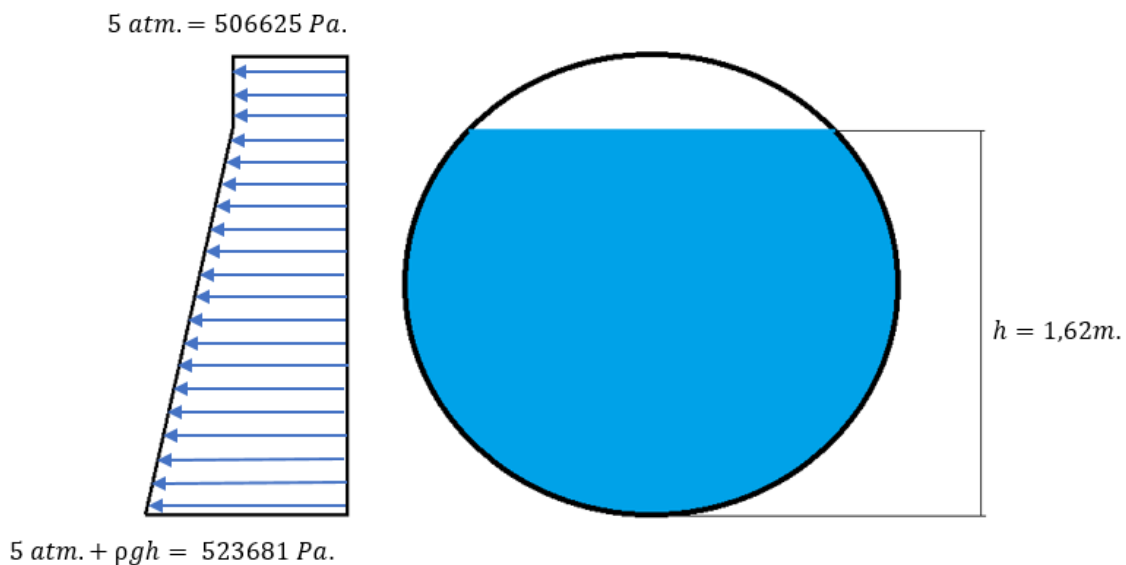


Ilustración 4

Se realiza la comprobación de que la carga se ha introducido correctamente; la diferencia entre las reacciones verticales en los apoyos y el peso de la estructura del semirremolque es igual a la masa de la carga útil simulada mediante la presión hidrostática:

$$34845 \text{ Kg. (reacciones apoyos) } - 8534 \text{ Kg. (peso estructura) } = 26311 \text{ Kg. (Qútil)}$$

Se aplica la aceleración de la gravedad al modelo.

4.3.2. CASO ESTÁTICO

El objetivo de calcular este caso es obtener las reacciones y desplazamientos existentes en los bulones de los soportes, diapreses y King-pin para así ajustar el modelo de cara la simulación de los diferentes casos que se verán a continuación.

Se introducen las fuerzas verticales de los diapreses modeladas como muelles de rigidez constante dada por el departamento de transportes de la universidad de Zaragoza calculadas en proyectos anteriores.

De la misma manera se introducen las fuerzas que reciben los bulones de los soportes de la suspensión simuladas como muelles de sección variable.

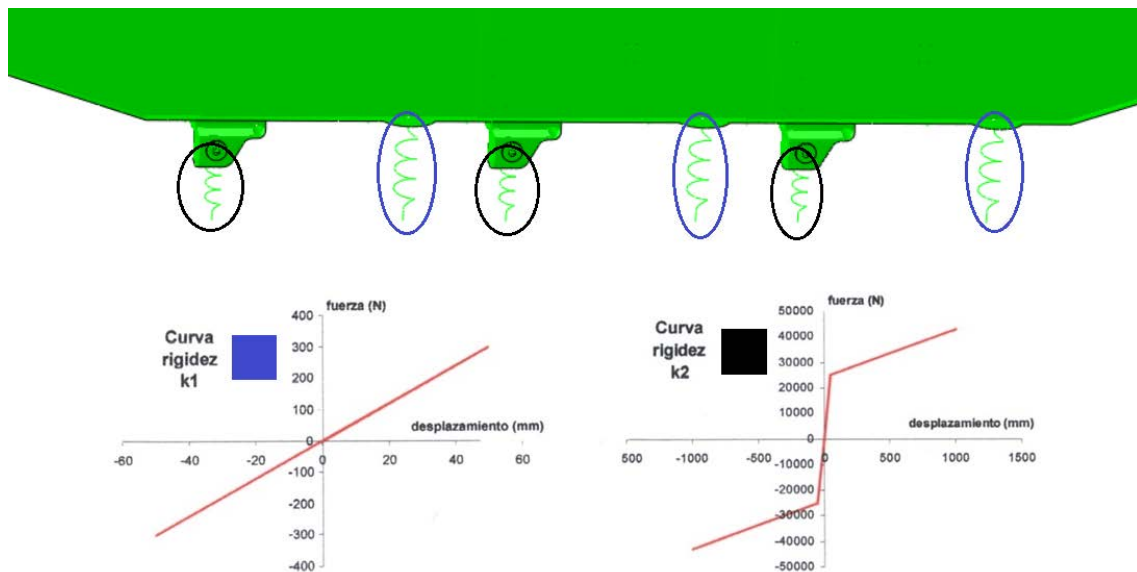
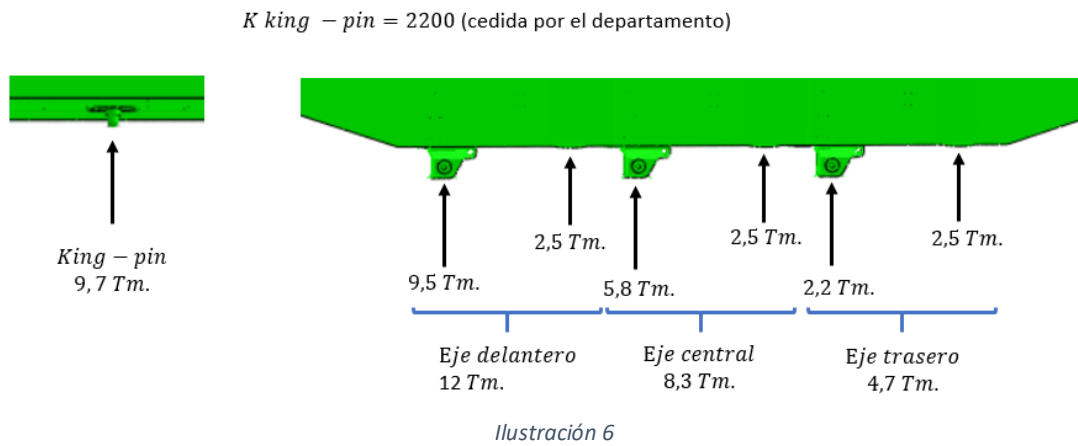


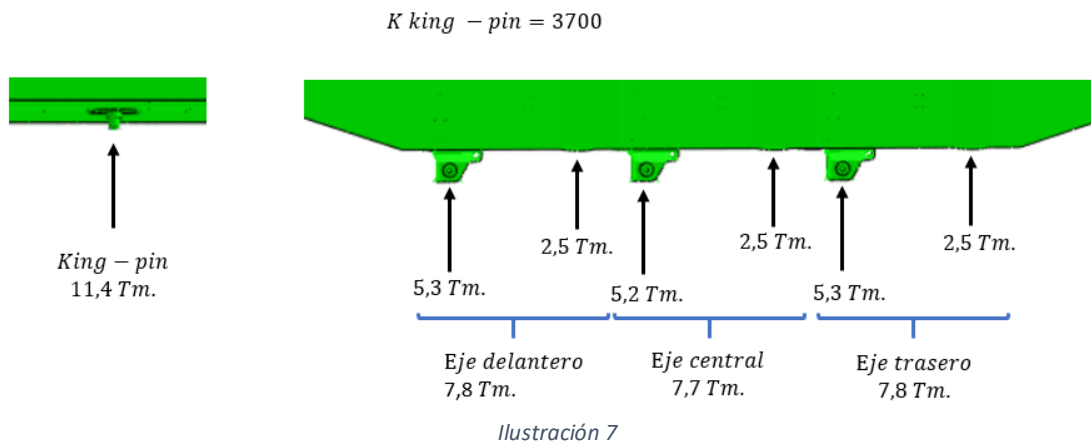
Ilustración 5

Por último, se introduce la fuerza vertical que ejerce la cabina sobre el King-pin mediante la simulación de otro muelle de rigidez constante. En este caso no nos sirve la experiencia del departamento debido a que la cisterna confiere a nuestro semirremolque una rigidez excepcional muy superior a la de un semirremolque convencional, lo que ocasiona que todo el semirremolque cabecee hacia delante de forma que el eje delantero se comprime más que el trasero obteniendo reacciones muy desiguales en cada eje.

Se muestra a continuación:



Para solucionar este problema se introduce una rigidez mayor en la ecuación del muelle del King-pin hasta conseguir que las suspensiones de los tres ejes trabajen de igual manera:



Esta diferencia es debida a que en un semirremolque convencional la estructura flexa entre el King-pin y los ejes de la suspensión, por ello las cabinas tractoras regulan la fuerza vertical que ejercen sobre el King-pin en función del semirremolque que transporten, fenómeno que se ha emulado aumentando la rigidez del muelle.

A continuación, se muestran las condiciones de contorno aplicadas:

G.D.L. CASO ESTÁTICO		Bulónes soportes suspensión	Diapreses	King-pin
DESPLAZAMIENTOS	Eje longitudinal	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	restringido	libre	restringido
	Eje vertical	muelle K2	muelle K1	muelle K king-pin
GIROS	Eje longitudinal	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	libre	libre	restringido
	Eje vertical	restringido	libre	restringido

Tabla 8

Se restringen los giros en el King-pin debido a que, aunque están permitidos pequeños giros en la realidad, son mínimos y de esta forma favorecemos el cálculo.

4.3.3. CASO DE APOYO EN PATAS

Este caso simula los esfuerzos que sufre la estructura cuando se encuentra el semirremolque estacionado sobre sus patas, desenganchado de la cabina tractora.

Para emular esta situación se sustituye el apoyo en el King-pin por el apoyo en el soporte de las patas.

A continuación, se muestran los grados de libertad restringidos para este cálculo:

G.D.L. CASO APOYO EN PATAS		Bulónes soportes suspensión	Diapreses	Soporte patas de estacionamiento
DESPLAZAMIENTOS	Eje longitudinal	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	restringido	libre	restringido
	Eje vertical	restringido	muelle K1	restringido
GIROS	Eje longitudinal	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	libre	libre	libre
	Eje vertical	restringido	libre	restringido

Tabla 9

Como se aprecia en la gráfica, para este cálculo se han eliminado los muelles en los soportes de la suspensión y se han restringido sus desplazamientos verticales.

Se ha realizado de esta manera debido a que en nuestro modelo se restringe el movimiento en los tornillos de la parte superior de las patas mientras que en realidad el empotramiento se produce a ras de suelo. Debido a esta diferencia, cuando se ensaya nuestro modelo, si no se impide el

desplazamiento vertical en los apoyos, el semirremolque cuelga de atrás hasta alcanzar el equilibrio con la rigidez de los muelles y puesto que hemos restringidos el movimiento en los tornillos de la zona superior de las patas, se produciría una concentración de tensiones que no ocurre en la realidad, se puede ver este fenómeno magnificado, en la siguiente figura.

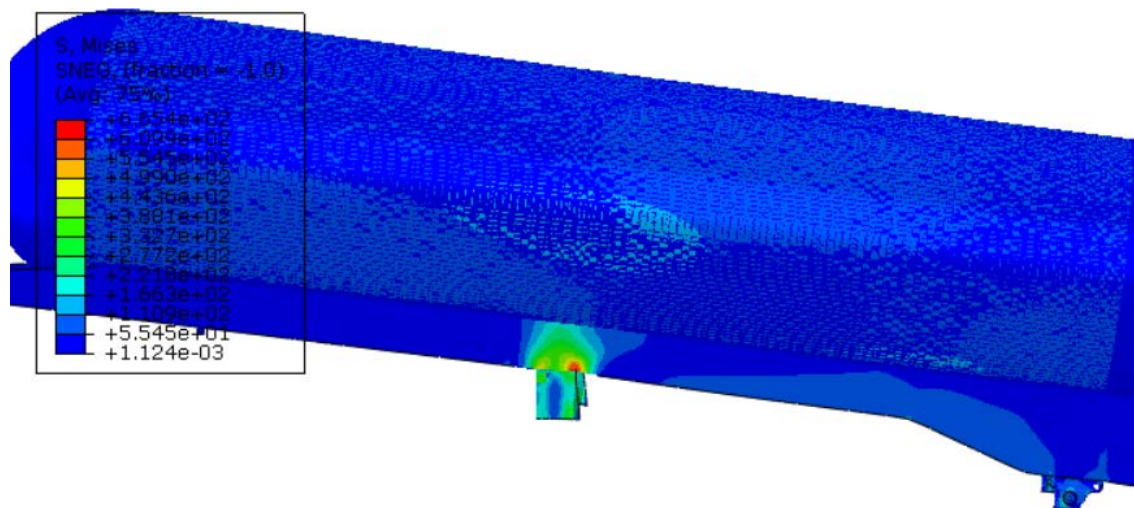


Ilustración 8

4.3.4. CASO DE FRENADO

En este caso se somete el modelo a la aceleración máxima a la que se puede ver sometido un semirremolque en las condiciones más favorables para la frenada, con el máximo coeficiente de rozamiento con neumáticos nuevos y la calzada en las mejores condiciones.

Para simular este fenómeno se introduce una aceleración de 0,8 veces la aceleración de la gravedad que se aplica a todo el modelo y puesto que la carga la hemos simulado mediante una presión hidrostática, debemos añadir una fuerza en dirección longitudinal equivalente a la que generaría esa aceleración en la carga útil.

Esta fuerza se modela repartida en los nodos de la semiesfera delantera. Puesto que existen dos zonas de con un tamaño de malla sensiblemente diferente, para distribuir la carga de forma uniforme se tiene en cuenta la concentración de nodos por área de cada zona de la semiesfera.

$$F \text{ total a distribuir} = 26Tm. \times 0,8 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 203,84 \text{ KN}$$

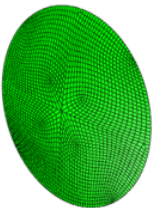
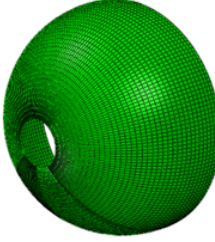
	Círculo interior	Corona exterior
		
Area (m2)	0,105	2,67
Fuerza total aplicada (N)	7768	196072
Nº de nodos	2232	7059
Fuerza/nodo (N)	3,48	27,78
Fuerza total / Superficie (KN/m2)	73,6	73,6

Ilustración 9

Las condiciones de contorno son las mismas que las aplicadas en el caso estático (tabla 8).

4.3.5. CASO DE CURVA

En este caso se simula la aceleración lateral máxima que puede sufrir un semirremolque trazando una curva.

Para ello se realiza el mismo proceso que para el caso de la frenada, aplicando una aceleración en esta ocasión de 0,4 veces la aceleración de la gravedad en dirección transversal.

La fuerza correspondiente a la masa del nitrógeno líquido se aplica distribuida en los nodos de la pared lateral situada en el exterior de la curva.

A continuación, se muestran las condiciones de contorno aplicadas para este caso:

G.D.L. CASO CURVA		Bulónes soportes suspensión interiores	Bulónes soportes suspensión exteriores	Diapreses	King-pin
DESPLAZAMIENTOS	Eje longitudinal	restringido	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	libre	restringido	libre	restringido
	Eje vertical	muelle K2	muelle K2	muelle K1	muelle K King-pin
GIROS	Eje longitudinal	restringido	restringido	libre	restringido
	Eje transversal	libre	libre	libre	restringido
	Eje vertical	restringido	restringido	libre	restringido

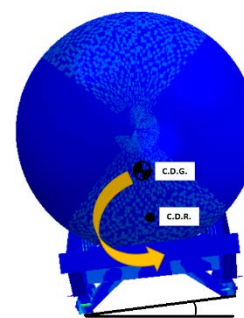


Ilustración 10

Tabla 10

Se restringe el giro del eje longitudinal en el King-pin debido a que el valor límite de inclinación en ese eje por normativa es de tan sólo 3 grados.

Como se observa en la tabla 10, se liberan los desplazamientos transversales de los soportes de la suspensión del lado interior a la curva de forma que los esfuerzos transversales recaen sobre el King-pin y los apoyos exteriores.

Se realiza esta variación debido a que, en una curva, el agarre o fuerza de rozamiento de las ruedas exteriores es mayor que la de las interiores debido a que el centro de gravedad en cualquier vehículo se sitúa por encima del centro de rotación y por tanto bajo una aceleración lateral las reacciones verticales en las ruedas exteriores son mayores que en las interiores, si bien en una situación real este fenómeno es menos restrictivo que en nuestro cálculo.

4.3.6. CASO DE GIRO DE RADIO MÍNIMO

Una de las maniobras más importantes y desfavorables desde el punto de vista resistente para un semirremolque de carga convencional y más si cabe para un semirremolque cisterna debido a su rigidez, es el giro de radio mínimo.

En este caso se simulan los esfuerzos a los que es sometido el semirremolque cuando la cabina está maniobrando y forma 90° con él, de forma que el semirremolque rota sobre su segundo eje y primero y tercero son arrastrados en dirección transversal. En la siguiente figura se aprecia el giro comentado anteriormente:

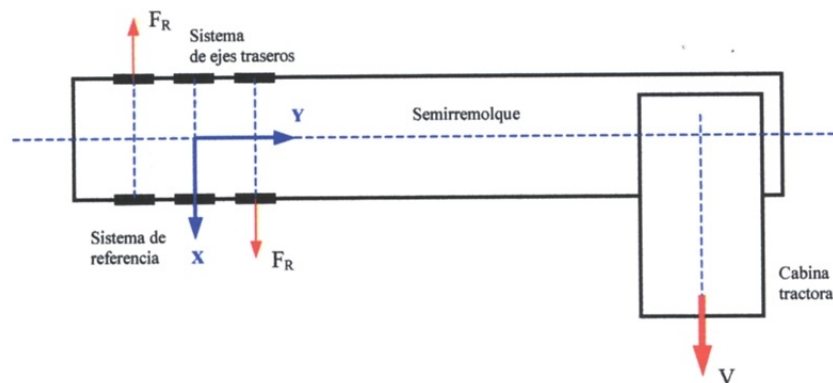


Ilustración 11

En esta maniobra el modelo se ve sometido a un gran esfuerzo de torsión debido a las fuerzas transversales (F_R) que se generan en el primer y tercer eje.

Para realizar el cálculo, el conjunto de sollicitaciones creadas en cada una de las ruedas se simula por medio de la aplicación de fuerzas y momentos equivalentes sobre el nodo de referencia del bulón de cada uno de los soportes.

Se representa a continuación el esquema de las fuerzas aplicable al primer y tercer eje:

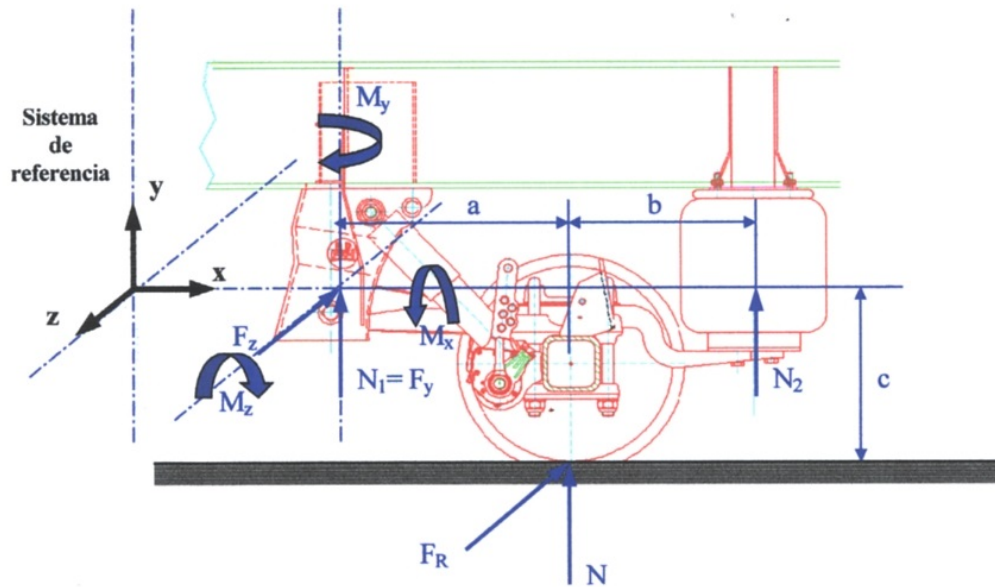


Ilustración 12

La fuerza vertical (N) se reparte como una biga biapoyada entre soporte (F_y) y diapress (N_2), este último como en el resto de casos solo admite esfuerzos verticales, por tanto, la fuerza de rozamiento (F_R) la absorbe por completo el soporte (F_z).

Estas fuerzas (F_R y N) también crearán dos momentos sobre el soporte; M_x y M_y . En el eje Z no habrá momento debido al giro libre del bulón sobre el soporte.

Para el primer eje se obtienen los siguientes esfuerzos:

$$\begin{aligned}
 F_{y \text{ soporte}} &= 26647N \\
 F_{y \text{ diapress}} &= 12664N \\
 F_z = F_R = N \mu &= -55034N \\
 M_x = F_R c f_1 &= -5795095Nmm \\
 M_y = F_R a f_2 &= 2660570.5Nmm
 \end{aligned}$$

Donde se han considerado los siguientes valores:

Coeficiente de rozamiento $\mu = 1.4$ (Estimado por Lecitrailer).

Los coeficientes de minoración del momento $f_1 = 0.3$ y $f_2 = 0.1$ (cedidos por Lecitrailer y debidos a que parte del momento generado es absorbido por la suspensión neumática).

$a = 483.5mm$, $b = 367.4mm$, $c = 351mm$ por geometría del modelo.

➤ Para el tercer eje de forma análoga se obtiene:

$$\begin{aligned}F_{y \text{ soporte}} &= 25952.4N \\F_{y \text{ diapress}} &= 12669N \\F_z = F_R = N \mu &= 55043.9N \\M_x = F_R c f_1 &= 5796119.5Nmm \\M_y = F_R a f_2 &= -2661040.9Nmm\end{aligned}$$

A su vez en el segundo eje, únicamente se generan esfuerzos verticales debido a que como ya se ha explicado anteriormente, el vehículo rota sobre este eje y por tanto no existen fuerzas transversales:

$$\begin{aligned}F_{y \text{ soporte}} &= 25952.4N \\F_{y \text{ diapress}} &= 12669N\end{aligned}$$

Una vez aplicadas las cargas se definen las condiciones de contorno, únicamente se impiden los desplazamientos en todos los ejes del King-pin y los transversales en el segundo eje, el resto de grados de libertad quedan libres.

5. POSTPROCESO: ANALISIS DE RESULTADOS Y OPTIMIZACIÓN.

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez diseñado el semirremolque, modelado mediante elementos finitos y aplicadas las cargas, se procede a lanzar el análisis numérico de la estructura, para ello se utiliza el software Abaqus mediante el cual se obtienen las tensiones equivalentes de Von Mises para cada elemento, así como sus desplazamientos y la deformada.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos más importantes para cada modelo frente a las diferentes casuísticas ensayadas.

Se muestran los resultados de los valores máximos de tensión de Von Mises obtenidos para cada componente, así como su coeficiente de seguridad y su espesor.

Para profundizar en los resultados de cada modelo ensayado frente a cada caso de carga o visualizar su deformada acudir a anexo E.

5.2. MODELO INICIAL.

Se calcula el modelo inicial para cada caso de carga. Se muestran a continuación los resultados de los valores máximos de tensión equivalente de Von Mises obtenidos para cada componente, su coeficiente de seguridad, espesor y en qué caso de carga se da esa tensión máxima.

Caso:		MÁXIMO		
RESULTADO CALCULOS PRIMER MODELO	Espesor(mm.)	VM(Mpa)	CS	CASO
Chapa deslizamiento	5	244	1,455	Frenado
Chapa Kingpin	8	335	1,060	Frenado
Cierre delantero y trasero	5	59	6,017	Radio mínimo
U delanteras	5	356	0,997	Frenado
Soporte estacionamiento	6	213	1,667	Apoyo patas
Viga estacionamiento	4	105,5	3,365	Apoyo patas
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	12	45	7,889	Apoyo patas
Nervios	8	343,2	1,034	Radio mínimo
U rigidificadoras suspensión	5	361,1	0,983	Radio mínimo
Alas viga suspensión	6,9	165,1	2,150	Radio mínimo
Almas viga suspensión	4,7	159,2	2,230	Radio mínimo
Alas travesaño	4,2	100,5	3,532	Radio mínimo
Almas travesaño	3,3	30,9	11,489	Radio mínimo
Escuadra rigidificadora superior	10	190,3	1,865	Radio mínimo
Escuadra rigidificadora inferior	12	188,1	1,887	Curva
Llanta superior	12	274,2	1,295	Radio mínimo
Llanta inferior	12	205	1,732	Curva
Almas largueros	6	356,4	0,996	Radio mínimo
Cilindro exterior	5	235	1,511	Radio mínimo
Cilindro interior	5	159,3	2,228	Radio mínimo
Semiesferas interiores	5	41	8,659	Radio mínimo
Semiesferas exteriores	5	61,7	5,754	Curva
Cisterna perlita(volumétrica)	50	0,3	1,333	Radio mínimo

Tabla 11

El material empleado en toda la estructura metálica es **acero S-355**.

Se obtienen los resultados esperados, la zona delantera recibe mayores esfuerzos en la frenada como consecuencia de la deceleración, las zonas cercanas al apoyo en patas sufren durante el estacionamiento, mientras que todo el bloque central; componentes de la zona de la suspensión, largueros, travesaños y nervios soportan mayores tensiones en el caso de radio mínimo debido a la torsión que experimenta el semirremolque.

Se observa como los componentes encargados de rigidificar el alma de los largueros sufren debido al aumento de la altura de los mismos (nervios y Us rigidificadoras suspensión)

En este primer modelo varios componentes presentan un coeficiente de seguridad muy ajustado, incluso hay componentes que superan el límite elástico del material y por tanto experimentan deformación plástica.

A su vez otros presentan un coeficiente de seguridad excesivamente elevado incurriendo en un aumento de peso y en un coste de material innecesario.

5.3. MODELO OPTIMIZADO

5.3.1. CONSIDERACIONES

A la vista de los resultados anteriores se procede a modificar el espesor y el material de algunos componentes para conseguir que toda la estructura trabaje en la zona elástica del material con un coeficiente de seguridad de 1,5.

Con el fin de aligerar más las cisternas de acero en el modelo optimizado, se independizan las partes cilíndricas de la esféricas en cuanto a elección de material y espesores. Esto es debido a que bajo la hipótesis de pared delgada, una superficie cilíndrica de radio r , sometida a una presión interna P experimenta el doble de tensión circunferencial que una superficie esférica de mismo radio y sometida a la misma presión como puede verse a continuación:

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{e} \quad (\text{Para un cilindro})$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{Pr}{2e} \quad (\text{Para una esfera})$$

donde

- P es la presión interna
- e es el espesor de la pared
- r es el radio interior del cilindro.
- σ_{θ} es la tensión circunferencial.

Por otro lado, para realizar la optimización, se ha de tener en cuenta que nos encontramos ante estructura hiperestática y la modificación de un componente afecta a otros que están trabajando de forma solidaria con él. Este fenómeno se agudiza en el caso de que uno de ellos este trabajando en zona plástica debido a que la pendiente de la curva de tensión-deformación cae drásticamente al pasar la zona de fluencia (ver anexo D) por lo que, para un pequeño incremento de tensión, el componente que trabaja en el rango plástico experimentará una gran deformación, mientras que el que trabaja en zona elástica para ese mismo incremento de tensión apenas sufre deformación. Interpretar correctamente las tensiones de cada componente permite alcanzar el modelo óptimo en menos iteraciones, si por ejemplo, se modifica un componente que trabaja en zona plástica hasta hacer que trabaje en zona elástica, otros componentes pueden experimentar una notable disminución de tensiones y un consecuente aumento del coeficiente de seguridad.

5.3.2. MODELO OPTIMIZADO

Se considera presentar dos modelos finales, un primer modelo más ligero que implementa el cilindro de la cisterna exterior construido en el acero de alto límite elástico Strenx 700MC y un segundo modelo más económico cuya única diferencia con el anterior es que este componente se realiza en acero S-355. Se comprueba que no resulta más económico debido a que para implementar S-355 es necesario doblar el espesor de la cisterna y este acero únicamente es un 20% más barato que el Strenx 700MC, por tanto la fabricación de este último modelo carece de sentido.

A continuación se muestran las tensiones de Von Mises obtenidas para el modelo final, los espesores escogidos para cada componente así como el material con el que ha sido diseñado.

MODELO OPTIMIZADO	Material	ESPESOR(mm.)	VM(Mpa)	CS
Chapa deslizamiento	355	4	244	1,45
Chapa Kingpin	700	6,5	484	1,45
Cierre delantero y trasero	355	2	65	5,46
U delanteras	700	6	424	1,65
Soporte estacionamiento	355	6	221	1,61
Viga estacionamiento	355	2	125	2,84
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	355	2	98	3,62
Nervios	355	10	219	1,62
U rigidificadoras suspensión	700	10	440	1,59
Alas viga suspensión	355	6,5	227	1,56
Almas viga suspensión	355	4,5	216	1,64
Alas travesaño	355	2	84	4,23
Almas travesaño	355	2	72	4,93
Escuadra rigidificadora superior	355	12	230	1,54
Escuadra rigidificadora inferior	355	7	232	1,53
Llanta superior	700	5,5	476	1,47
Llanta inferior	700	6	477	1,47
Almas largueros	700	4,5	432	1,62
Cilindro exterior	700	2	356	1,97
Cilindro interior	355	2	235	1,51
Semiesferas interiores	355	2	92	3,86
Semiesferas exteriores	355	2	114	3,11
Cisterna perlita(volumétrica)	0,4	50	0,3	1,33

Tabla 12

Se puede observar como se ha conseguido que cada componente trabaje en su zona elástica con un adecuado coeficiente de seguridad adecuado.

5.3.3. ESTUDIO DE PANDEO

Con motivo de la importante reducción de espesores en determinados componentes se ha decidido realizar un estudio de pandeo para calcular si la estructura se ve afectada por este fenómeno. Para ello se calculan los 20 primeros modos de pandeo para el caso estático y de radio mínimo.

Se comprueba que la estructura presenta un elevado coeficiente de seguridad ante problemas de pandeo. A continuación se presentan los dos modos más críticos con coeficientes de seguridad de 3.19 para la viga de suspensión y 3.6 para la cisterna:

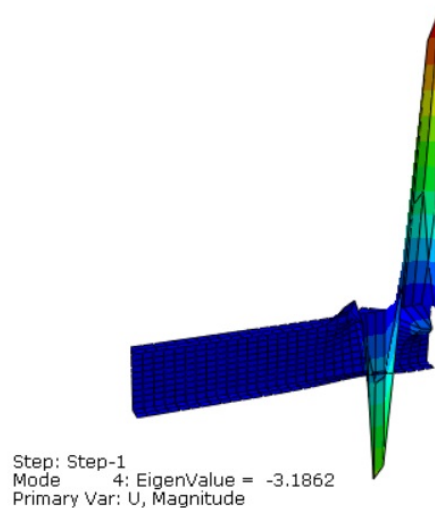


Ilustración 13

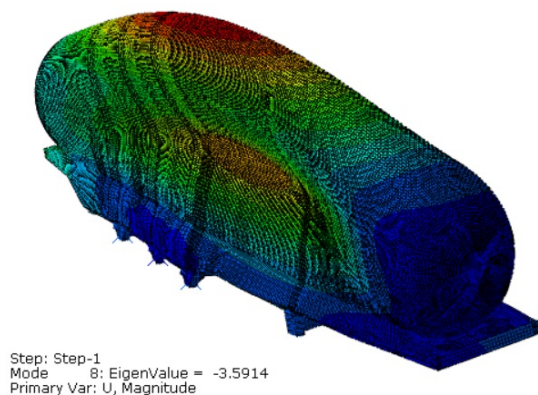


Ilustración 14

El resto de modos pueden verse en anexo E

5.3.4. COMPARATIVA MODELO INICIAL Y OPTIMIZADO

En la tabla 13 se muestran los espesores y pesos de los componentes de los modelos inicial y optimizado.

	Modelo inicial		Modelo optimizado			Ahorro peso
	Espesor(mm)	peso (kg)	Material	Espesor(mm)	peso (kg)	
Chapa deslizamiento	5	57,8	355	4	46,2	11,6
Chapa Kingpin	8	97,9	700	6,5	79,5	18,4
Cierre delantero y trasero	5	18	355	2	7	11
U delanteras	5	98,8	700	6	118,6	-19,8
Soporte estacionamiento	6	14,5	355	6	14,5	0
Viga estacionamiento	4	19,4	355	2	9,7	9,7
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	12	12,6	355	2	2	10,6
Nervios	8	19,8	355	10	24,7	-4,9
U rigidificadoras suspensión	5	33	700	10	65,9	-32,9
Alas viga suspensión	6,9	29,8	355	6,5	28	1,8
Almas viga suspensión	4,7	20	355	4,5	19,1	0,9
Alas travesaño	4,2	11,75	355	2	5,6	6,15
Almas travesaño	3,3	7,8	355	2	4,7	3,1
Escuadra rigidificadora superior	10	7,3	355	12	8,7	-1,4
Escuadra rigidificadora inferior	12	14	355	7	8,2	5,8
Llanta superior	12	258,7	700	5,5	118,6	140,1
Llanta inferior	12	305,3	700	6	152,6	152,7
Almas largueros	6	516,3	700	4,5	387,2	129,1
Cilindro exterior	5	2794,5	700	2	1117,8	1676,7
Cilindro interior	5	2653,4	355	2	1061,4	1592
Semiesferas interiores	5	432,9	355	2	173,1	259,8
Semiesferas exteriores	5	480,2	355	2	192	288,2
Cisterna perlita(volumétrica)	50	521,8	0,4	50	521,8	0
TOTAL		8534			4240	4294

Tabla 13

Se ha conseguido un ahorro de peso de 4300Kg. Se produce en los componentes de mayor tamaño sometidos a grandes esfuerzos ya que es donde se puede ahorrar gran cantidad de material implementando acero de alto límite elástico:

- ✓ En los largueros debido a la introducción de acero de alta resistencia tanto en almas como en alas de los mismos.
- ✓ En ambas cisternas, en el cilindro interior debido a que el espesor considerado en el modelo inicial era muy elevado para las tensiones que debe soportar, en el exterior por medio de la introducción de Strenx 700MC que debido a la reducción de espesor tan significativo no solo redonda en un ahorro de peso sino que también reduce el coste del material. También se realiza un aligeramiento notable en las

semiesferas de ambas cisternas consecuencia de la hipótesis de pared delgada explicada en el apartado 5.3.1.

En la siguiente tabla se muestra el coste de material de la estructura metálica para cada modelo:

	Modelo inicial		Modelo optimizado		Precio(€/Kg.)
	Peso total (Kg.)	Coste (€)	Peso total (Kg.)	Coste (€)	
Acero S355	8534	5547,1	2040,2	1326,13	0,65
Acero Strenx 700MC	0	0	2199,8	1759,84	0,8
Coste total(€)	5547,1		3085,97		

Tabla 14

$$\text{Ahorro costes material} = 2461.13\text{€}$$

Por tanto se obtiene un semirremolque más ligero y con unos costes de fabricación notablemente inferiores.

Por último se muestra una tabla comparativa de la capacidad portante de cada uno de los modelos:

	Modelo inicial	Modelo final
Cabina tractora (Tm.)	8	8
Estructura semirremolque (Tm.)	8,53	4,24
conjunto ejes-suspensiones (Tm.)	2,1	2,1
Q_{util} (Tm.)	21,37	25,66
Peso total/ Máximo autorizado (Tm.)	40	40

Tabla 15

De forma que casi se alcanzan las 26 toneladas de Nitrógeno líquido estimadas al inicio y con las que se han realizado todos los ensayos.

6. CONCLUSIÓN

Considero que este proyecto ha sido una gran experiencia a nivel personal y que aporta un gran valor añadido a mi vida profesional en el campo de la ingeniería que a mí me gusta y para el que he estudiado, el diseño de máquinas y vehículos.

Destacaría el invisible trabajo previo de formarme en el uso de las herramientas informáticas utilizadas para los cálculos.

En cuanto al proyecto en sí, considero que se ha realizado un buen trabajo de diseño, lo que ha facilitado las fases posteriores de cálculo, análisis y optimización, resultando un modelo óptimo muy válido.

Este proyecto se podría considerar un buen punto de partida para otros posteriores, que por extensión no se han podido realizar en el presente proyecto, como por ejemplo, el diseño de alas en los largueros de sección variable para conseguir una distribución de tensiones uniforme en el apoyo con la cisterna o la realización de un estudio térmico del modelo.

7. BIBLIOGRAFIA

PATRAN: <http://www.mscsoftware.com/es>

ABAQUS: <http://129.97.46.200:2080/v6.13/>

REFERENTE A NORMATIVA VIGENTE: <http://www.dgt.es/>

ACEROS: <https://www.ssab.com/>

ZAGUAN DE UNIZAR: <https://zaguan.unizar.es/?ln=es>

PROPIEDADES DE MATERIALES EMPLEADOS: <http://ingemecanica.com/>

PFC: Diseño de una bancada de ensayos de fatiga para semirremolques (de D. Hugo Malón Litago)

ANEXO A: MEDIOS UTILIZADOS EN LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

A.1 METODOLOGÍAS APLICADAS PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

En los siguientes apartados se expondrán las metodologías que han sido utilizadas para abordar el problema que se ha de resolver, tanto cálculos tradicionales como el uso de métodos numéricos avanzados implementados en programas de cálculo informático.

A.1.1 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc. debido a que permite resolver casos que hasta los años cincuenta eran muy difíciles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Este método ha ido desarrollándose hasta la actualidad, pudiéndose considerar como el método numérico más extendido en los diversos campos de la ingeniería, ya que permite obtener los desplazamientos, deformaciones o tensiones en un continuo elástico.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, siendo más fácil y económico de modificar que un prototipo, no dejando de ser un método de cálculo aproximado debido a las hipótesis básicas del modelo.

En cualquier sistema que se ha de analizar podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor...
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, deformaciones...

La idea general de este método es la distribución de un dominio espacial en un conjunto de geometrías más simples, pudiéndose ser uni-, bi- o tridimensionales. Estas geometrías más simples reciben el nombre de elementos. La geometría de estos elementos queda definida por un conjunto de puntos, los cuales son denominados nodos, y que conectan entre sí los elementos. En el interior de cada elemento se interpola una función de desplazamientos que se formula en función de los valores de éstos que existen en los nodos.

La metodología consiste en aplicar sobre estos elementos las ecuaciones de compatibilidad y comportamiento, obteniendo una relación entre la fuerza aplicada sobre los elementos y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante la matriz elemental, la cual depende del material utilizado, de la geometría de los elementos, del número de nodos, de dónde se encuentran situados los nodos y del tipo de problema que se analiza.

Dependiendo del tipo de formulación del problema se determina si el problema es lineal (elasticidad lineal) o si es no lineal (grandes desplazamientos o deformaciones y comportamiento del material complejo).

Como toda metodología, el MEF sigue un **proceso de cálculo** para la resolución de los problemas. El proceso es el siguiente:

- I. Planteamiento de la continuidad de desplazamientos y del equilibrio de fuerzas entre los distintos elementos.***
- II. Sistema de ecuaciones globales de la estructura.***
- III. Tipo de formulación inicial (lineal o no lineal).***
- IV. Resolución.***
- V. Obtención de los desplazamientos nodales, que son las incógnitas básicas del problema.***
- VI. Obtención de otras variables como tensiones y deformaciones.***

La aproximación de elementos finitos no requiere la selección del tipo de ecuación que será usada para modelar la estructura. Los códigos disponibles en el mercado han definido previamente los elementos para los cuales la matriz de rigidez elemental ha sido resuelta, necesitando únicamente el conocimiento de las características concretas de los elementos y la utilización.

De esta forma, se debe decidir previamente la geometría requerida para modelar el problema. Dicha geometría puede ser:

- Unidimensional: vigas y cables.
- Bidimensional: tensiones o deformaciones planas.
- Bidimensional, axisimetría: láminas y sólidos de revolución.
- Tridimensional: láminas y sólidos.

Después, el usuario solo tiene que **definir el tipo de elemento** que ha sido utilizado en el mallado. Una vez que el elemento ha sido definido, el procedimiento es el siguiente:

- Seleccionar el tipo de elemento y formular la matriz de rigidez, si se requiere.
- Definir la matriz que relaciona las deformaciones del elemento con los desplazamientos nodales (se denomina {B}).
- Definir la matriz de la ley constitutiva (se denomina {D}).
- Aplicar una rutina numérica cuadrática para evaluar la rigidez del elemento sobre el volumen.

La matriz de rigidez es:

$$[K] = \int_V \{B\}^T X \{D\} X \{B\} X dv$$

El MEF consiste en dividir un medio continuo en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica en un número finito de parámetros. Se pasa de un sistema con infinitos grados de libertad a otro con un número finito de grados, con similares propiedades físicas y geométricas, en el que las ecuaciones de equilibrio se pueden expresar mediante un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un determinado número de incógnitas, obteniéndose la solución del sistema completo mediante el ensamblaje de las soluciones para cada elemento finito. **El proceso de modelización es el siguiente:**

- I. Discretizar la geometría de una malla.*
- II. Definir las localizaciones de los nodos de los elementos.*

III. Refinar el mallado en las zonas de concentración de tensiones.

IV. Definir las propiedades locales del elemento.

- a. Anisótropo
- b. Isótropo
- c. Ortótropo

V. Siguiendo los pasos anteriores obtenemos la matriz de rigidez del elemento.

VI. Transformar la matriz de rigidez local del elemento en coordenadas globales.

VII. Obtener el ensamblaje de la matriz de rigidez superponiendo las matrices de rigidez globales de los elementos.

VIII. Definir las condiciones de contorno aplicadas al sistema y definir el vector de fuerzas nodales $\{F\}$, así como definir desplazamientos, nodos fijos, contactos, carga, temperatura...

IX. Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales resultante usando los métodos apropiados.

X. Resolver tensiones y deformaciones locales de elementos. Calcular tensiones y deformaciones en lámina y comparar con el criterio de rotura.

Una vez que se han establecido las características de los nodos o los elementos, las ecuaciones individuales deben ensamblarse para formar un sistema global de ecuaciones que describa la respuesta general del sistema. Este ensamblaje da lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales cuya forma básica es la siguiente:

$$[K]\{u\} = F$$

en donde:

- $[K]$ = Matriz de rigidez del sistema ($n \times n$).
- $\{u\}$ = Vector ($n \times 1$) de desplazamientos, los cuales suelen ser desconocidos.
- F = Vector ($n \times 1$) de cargas aplicadas, las cuales suelen ser conocidas.

Los pasos que se siguen para la resolución del problema son los siguientes:

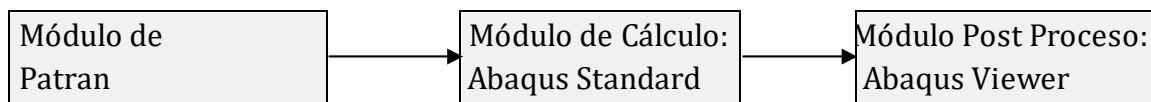


Figura A.1: Proceso seguido para la resolución de los problemas.

A.2 SOFTWARE UTILIZADO

Para la realización de este proyecto se han utilizado varias aplicaciones informáticas. La licencia de estos programas ha sido proporcionada por la Universidad de Zaragoza, y de ellos cuales dispone el Departamento de Ingeniería Mecánica de EINA.

Las herramientas de software son las siguientes:

- MSC. Patran 2012.
- Abaqus Standard
- Abaqus Viewer
- Para editar el proyecto, Microsoft Office: Word, Excell, PowerPoint...

A continuación se hará un comentario sobre los tres principales programas utilizados en el desarrollo de este proyecto, Patran 2012, Abaqus Standard y Abaqus Viewer.

A.2.1 MSC. PATRAN 2012

En la elaboración de este proyecto uno de los principales medios utilizados ha sido el programa de ordenador MSC. Patran 2012, particularmente los módulos de geometría y de mallado.

MSC. Patran 2012 ha sido usado para el preproceso de modelización. La utilización de este programa en el desarrollo de este proyecto precisó de la familiarización, aproximadamente durante un mes, con dicho programa a partir del seguimiento de manuales y la realización de pequeños ejemplos prácticos, siempre combinados con la inestimable ayuda y consejos de Director y Co-Director de este proyecto.

Una vez conocidas las bases del programa se comenzó a desarrollar el proyecto. Para la modelización, primero se diseñó la geometría a calcular, y posteriormente, se llevó a cabo la discretización deseada de dicha geometría. Los pasos que se han seguido son los siguientes:

1. En el módulo de **geometría**, y con la ayuda de la posibilidad de crear en el espacio puntos, rectas y superficies se genera el diseño geométrico de cada uno de los modelos a estudiar. En este caso, de cada una de las tres configuraciones de suelo.

2. En el modulo de mallado (MEF), se procede a la **discretización** de dicha geometría. Se procede a la división del conjunto en pequeñas divisiones, eligiendo el tipo de elemento a utilizar, los cuales son delimitados por nodos. En los casos resueltos en este estudio, la gran mayoría son cuadrados, pero también se han usado elementos triangulares. El tamaño de los elementos es elegido por el usuario, obteniendo con elementos de un menor tamaño una mayor precisión en el cálculo. También se debe tener en cuenta, que a mayor precisión, el tiempo de cálculo es mayor. Por lo tanto, se ha tratado de encontrar el equilibrio entre precisión deseada y el tiempo que se necesitaría para el cálculo.

Abaqus dispone de una amplia variedad de tipos de elementos con los que realizar el modelo, dependiendo de la geometría de partida y de la precisión de cálculo requerida. La figura A.2 nos muestra un ejemplo de los tipos de elementos más comunes.

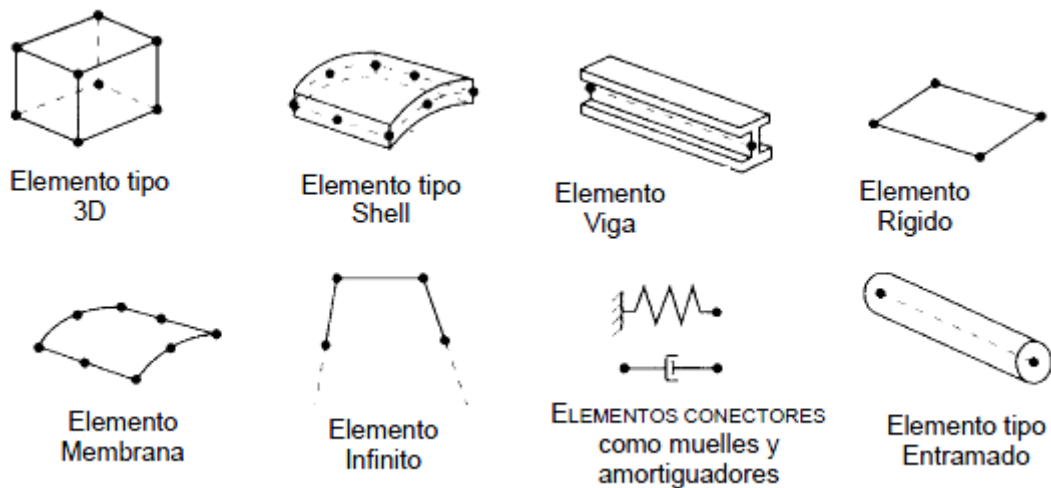


Figura A.2: Tipos de elementos más comunes.

De este modo, para nombrar cada uno de los diferentes elementos utilizados en el mallado de la geometría, Abaqus dispone del siguiente criterio:

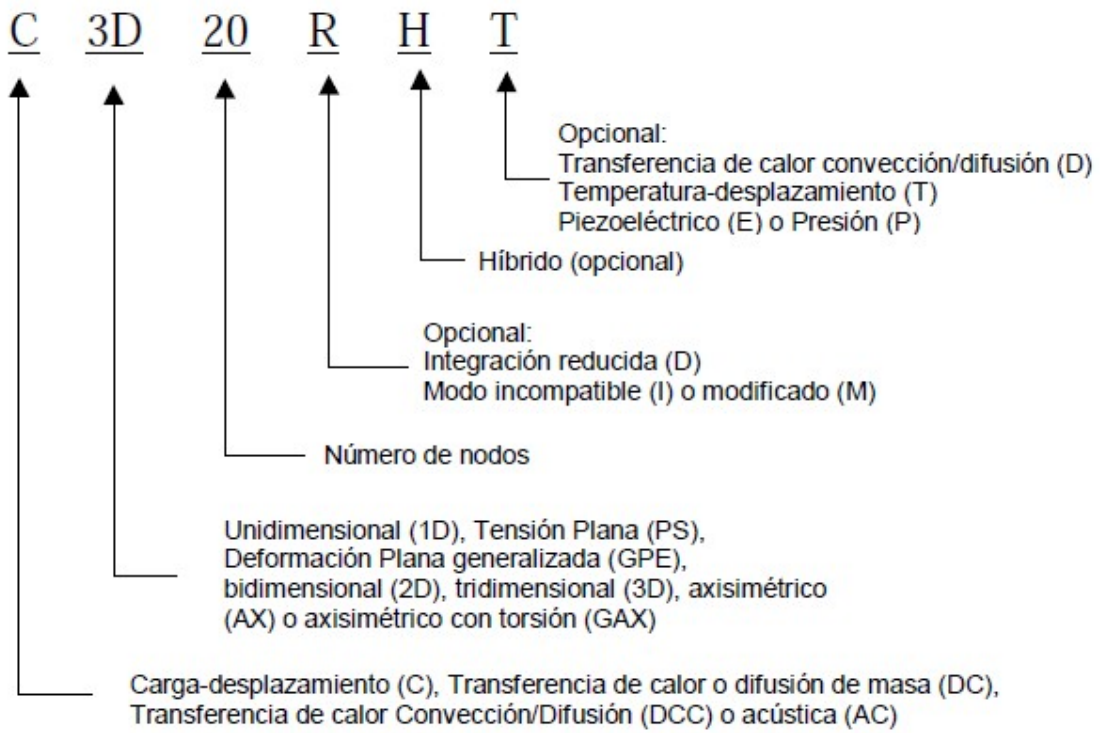


Figura A.3: Nomenclatura de los elementos.

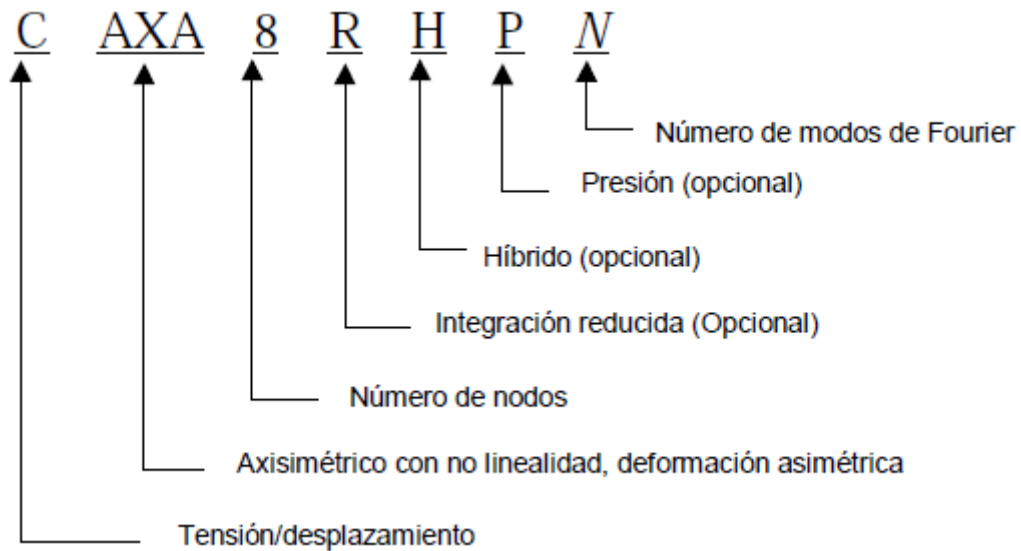


Figura A.4: Elementos axisimétricos con deformación no lineal.

3. En el módulo de **materiales**, se definen los materiales a utilizar en los modelos diseñados. Para ello, se introduce el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la densidad, los valores tensión - deformación,...
4. Finalmente, se introducen los valores de **carga** que actúan sobre el modelo, y el lugar en el que actúan. Además, se han de introducir las condiciones de contorno del sistema, teniendo en cuenta los contactos entre superficies diferentes y las condiciones de apoyo en desplazamiento.

Cumplimentados todos los pasos anteriores, MSC. Patran ya está en disposición de proceder a obtener el fichero de texto, dónde se recoge toda la información introducida en MSC. Patran, y que será el input de Abaqus. Este archivo servirá de base a Abaqus para realizar el cálculo.

Dicho archivo contiene el listado de todos los nodos que posee el modelo, incluyendo su número de designación y las coordenadas espaciales del mismo (respecto al sistema de coordenadas utilizado).

Lo siguiente en aparecer son los grupos que posee el modelo (el modelo se descompone en grupos, incluyendo en cada uno, una de las partes del modelo), el archivo recoge todos los nodos (NSET), y todos los elementos que componen cada grupo (ELSET).

A continuación, se muestra el material del que está hecho cada uno de los grupos, y si el grupo es tipo "shell", también se incluye el espesor de dicha lámina, los puntos de integración y el sistema de orientación de cada grupo.

Posteriormente, aparece el listado de materiales empleados en el diseño del modelo. Para cada uno de ellos, se muestra el nombre con el que ha sido definido, la densidad, el coeficiente de Poisson, el módulo elástico, el límite elástico y la tensión de rotura.

Después, se introducen las condiciones de contorno. Se muestran los nodos en los que se aplican dichas condiciones, y se recogen las restricciones que se aplican a cada uno de ellos.

Seguidamente, se definen los contactos entre las diferentes superficies, definiendo las regiones maestra y esclava de cada uno. Además, se introduce el tipo de cálculo a realizar. Este cálculo puede ser estático, dinámico,...

Para finalizar, se introduce el valor de las cargas que actúan sobre el modelo y los nodos sobre los que actúan. A su vez, se introducen también el valor de la gravedad, cargas térmicas,...

Este archivo permite realizar pequeñas modificaciones en el modelo con gran comodidad y sin necesidad de utilizar MSC. Patran 2012.

A.2.2 ABAQUS

Abaqus es el programa que se ha utilizado para realizar el cálculo de los modelos diseñados en MSC. Patran 2012. Este programa aplica El Método de los Elementos Finitos para lo cual precisa de toda la información que recoge el archivo input. Todo ello, a partir de la geometría, del tipo de malla, de las cargas, de las condiciones de contorno, de los materiales utilizados,...

El archivo se ejecuta desde la interfaz de MS-DOS. Una vez que se ha ejecutado, el programa se encarga de hacer una revisión general del archivo en busca de posibles fallos en la definición del modelo: discontinuidades, elementos que no tienen definidas sus propiedades,...

Cuando se ha verificado lo anterior el programa comienza a calcular. Durante el cálculo el problema que puede aparecer es falta de convergencia en el cálculo, pudiendo ser debido a una mala definición en los espesores, a errores de unidades,...

Abaqus puede realizar dos tipos de cálculo:

- Abaqus Standard: Es el método utilizado para realizar cálculos **estáticos**. Es el más extendido en el cálculo de estructuras y permite calcular su comportamiento mecánico, obteniendo valores de tensiones, deformaciones, desplazamientos, etc. Con este módulo de cálculo se aplica la teoría de los elementos finitos mediante integración implícita, lo que conlleva un mayor gasto computacional pero mayor precisión en los resultados.
- Abaqus Explicit: Corresponde con el otro módulo de cálculo convencional de ABAQUS y está desarrollado con una estructura completamente vectorizada para su utilización en supercomputadores. El análisis dinámico con explicit está basado en la implementación de una regla de integración explícita junto con el uso de matrices masa diagonales o agrupadas. Permite el cálculo de cualquier estructura sometida a cargas dinámica en el tiempo.

A.2.3 ABAQUS VIEWER

En el momento en que Abaqus completa el cálculo del modelo se crean una serie de archivos. Uno de los archivos, el cual tiene extensión “ODB”, es el que permite que Abaqus Viewer muestre los resultados obtenidos gráficamente. De este modo, se pueden observar los desplazamientos nodales, los mapas de tensiones y deformaciones, la estructura deformada,...

Este programa es una forma rápida y sencilla de conocer los resultados obtenidos. Las estructuras aparecen coloreadas en distintas tonalidades, para que el usuario conozca que zonas tienen una magnitud similar en cada una de las distintas mediciones, tanto de tensiones, como de desplazamientos,... Por tanto, el usuario solo tiene que acudir a la leyenda, y ver que magnitud le corresponde a dicho color.

Todo lo anterior, se puede realizar con ayuda de una gran variedad de herramientas: giros en el ángulo de visión, uso de zoom, ocultamiento de los grupos que no interesen en el análisis de resultados,...

ANEXO B: DISEÑO GEOMÉTRICO Y MALLADO DEL MODELO CRIOGÉNICO

En este anexo se procede a explicar el diseño geométrico y el mallado del modelo criogénico en un mismo anexo debido a que se han ido realizando de forma simultánea.

Para la realización de nuestro modelo partimos del modelo geométrico (.step) de semirremolque convencional de carga cedido por el área de transportes de la universidad de Zaragoza y que se muestra en la figura B.1 para posteriormente ir implementando las modificaciones oportunas hasta alcanzar el modelo final mostrado en la figura B.2.

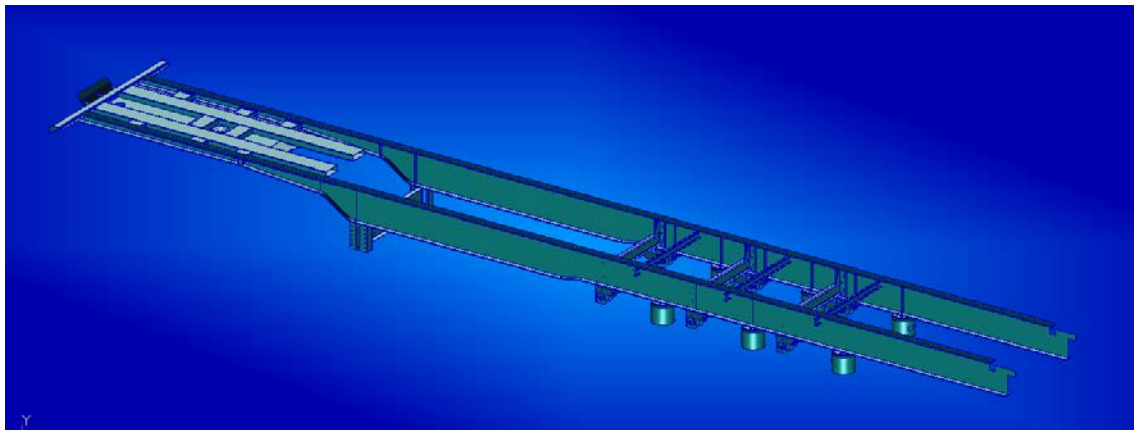


ilustración B 1

Para llevar este proceso a cabo se ha utilizado el programa Patran 2012.2.

En primer lugar y puesto que vamos a trabajar con elementos tipo Shell se procede a extraer superficies de los sólidos que componen el modelo inicial

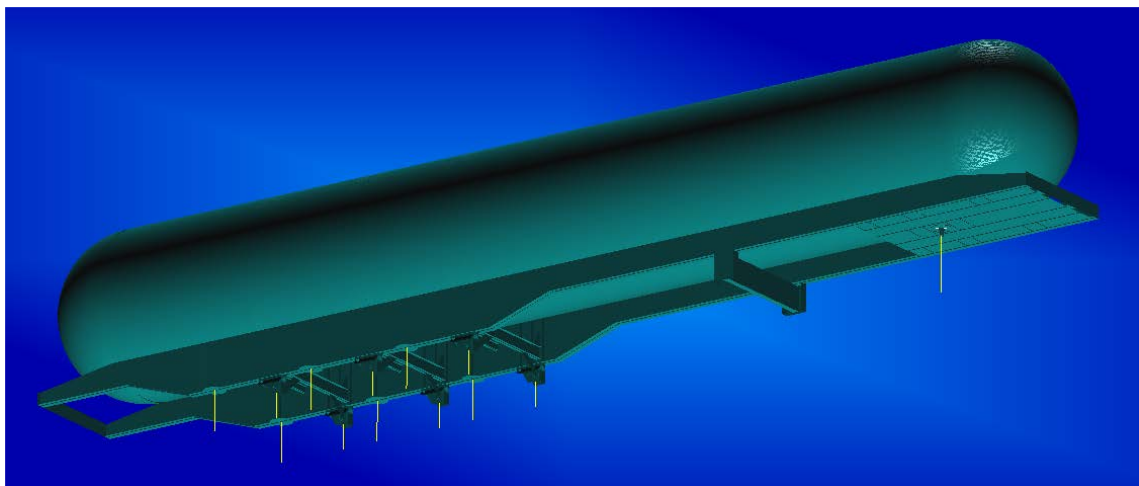


ilustración B 2

presentado en la figura B.1 anotando que superficie se han extraído de cada uno de

ellos así como su espesor. Esto es importante debido a que nos hará falta a la hora de la realización de la malla.

En la siguiente figura se puede apreciar el proceso de extracción de superficies.

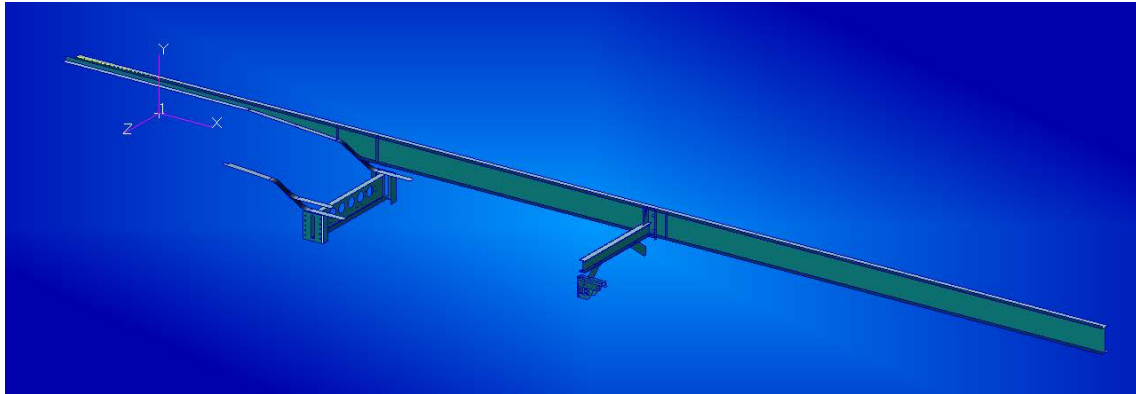


ilustración B 3

Como al extraer superficies de los sólidos obtenemos caras laterales de estos, habremos de trasladarlas posteriormente la mitad de su espesor en la dirección correcta o bien apuntar el offset que habremos de aplicar a los distintos elementos que conformen dicho sólido en la malla.

Puesto que nuestro modelo va a ser simétrico trabajaremos únicamente en un lado del semirremolque, posteriormente en los elementos centrales como el King pin y travesaños y por último haremos simetría para generar el lado restante.

Una vez tenemos las superficies principales extraídas pasamos a realizar las modificaciones geométricas necesarias para implementar en el semirremolque la cisterna criogénica.

Se plantean una serie de restricciones geométricas para las que se han llevado a cabo distintas soluciones:

En primer lugar surge el problema de que al implementar la cisterna sobre los largueros, como distan 1300mm entre ambos, el cilindro de la misma cuelga entre ambos dando lugar a una interferencia geométrica tanto con el King pin como con otros elementos como los travesaños de las suspensiones o las vigas de sección cuadradas rigidificadoras de la chapa deslizante delantera.

Para dar solución a este problema se han modificado los largueros aumentando la distancia entre sus alas el mínimo necesario para salvar estos elementos ya que al hacerlo se eleva el centro de gravedad del semirremolque y es

algo nunca deseable en un vehículo. En este cometido se presta especial atención a respetar otras restricciones geométricas como por ejemplo la posición relativa entre King pin y apoyos de la suspensión.

En la figura B.4 podemos apreciar la forma final del alma del larguero.

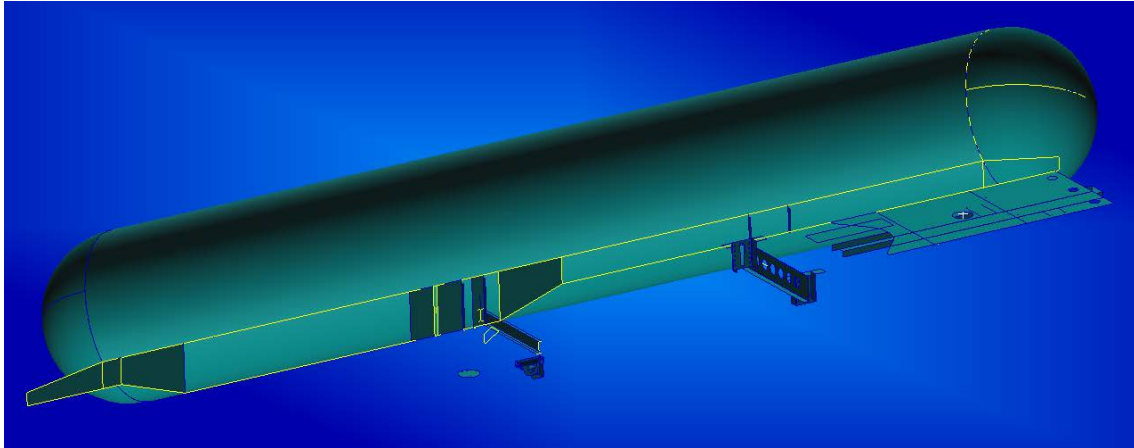


ilustración B 4

Puesto que el radio de la cisterna externa va a condicionar la altura necesaria del alma del larguero para salvar el King pin, así como el resto de elementos situados debajo de ella, se ha tenido que calcular previamente la geometría necesaria para el transporte de la cantidad máxima posible de carga útil.

Debido a la geometría de largueros que nos vemos forzados a implementar nos queda un alma considerable en la zona de las suspensiones (594mm) por lo que tendrán especial importancia los nervios rigidificadores ubicados en esa zona.

Una vez definidos los largueros así como el resto de piezas principales, el siguiente paso es estudiar cómo realizar la malla en las zonas de contacto de diferentes piezas así como hacer coincidentes fronteras de elementos en dos piezas que han de ir unidas por otro elemento.

Se trata siempre de conformar la malla por medio de elementos de cuatro nodos puesto que dan un mejor resultado que los elementos triangulares aunque como se verá más adelante esto no siempre será posible.

El caso concreto más complejo que aparece en nuestro modelo es la zona de los apoyos de la suspensión, en esta zona se ha de realizar la malla respetando

multitud de fronteras entre diversas piezas así como tratando de conseguir una geometría de elementos que no nos ocasione conflictos a la hora de lanzar el cálculo.

Un ejemplo de unión que se ha tenido que tener en cuenta en el apoyo de las suspensiones ha sido la unión mediante el rigidificador con el travesaño. Se puede apreciar en la figura B.5 como se ha hecho coincidir la frontera de los elementos tipo Shell del apoyo de la suspensión en el plano que contiene al rigidificador, de esta manera al realizar la malla los elementos nos quedan perfectamente cohesionados.

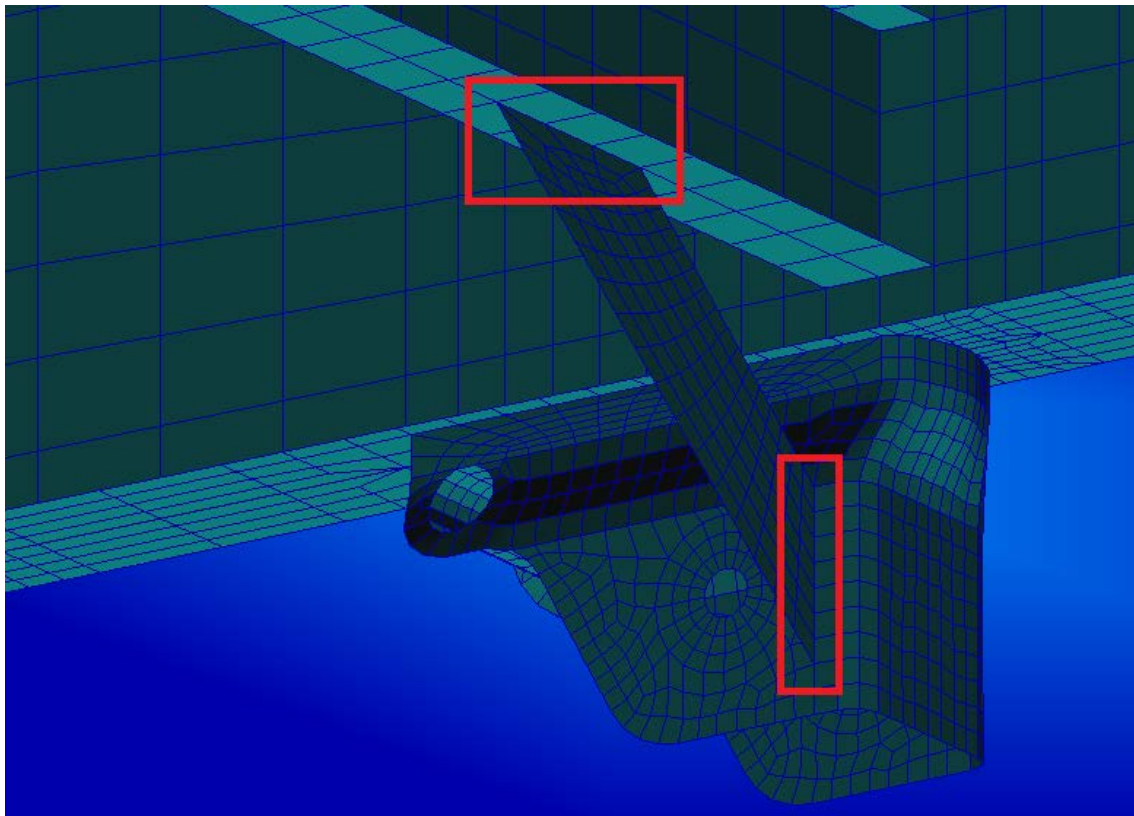


ilustración B 5

Esto se ha conseguido mediante el fraccionamiento de las diferentes partes de la mangueta en superficies más pequeñas que se han ido mallando de forma secuencial desde las más restrictivas hasta llegar a las que permitían una mayor libertad de mallado.

Otra dificultad destacable al realizar la malla han sido las zonas de transición de elementos de mayor tamaño debido a que proceden de piezas más grandes como los largueros o las llantas a zonas de menor tamaño de elemento como son los apoyos de la suspensión.

Un claro ejemplo de estas transiciones se puede ver en la zona de la llanta inferior en contacto con el apoyo de la suspensión y el alma:

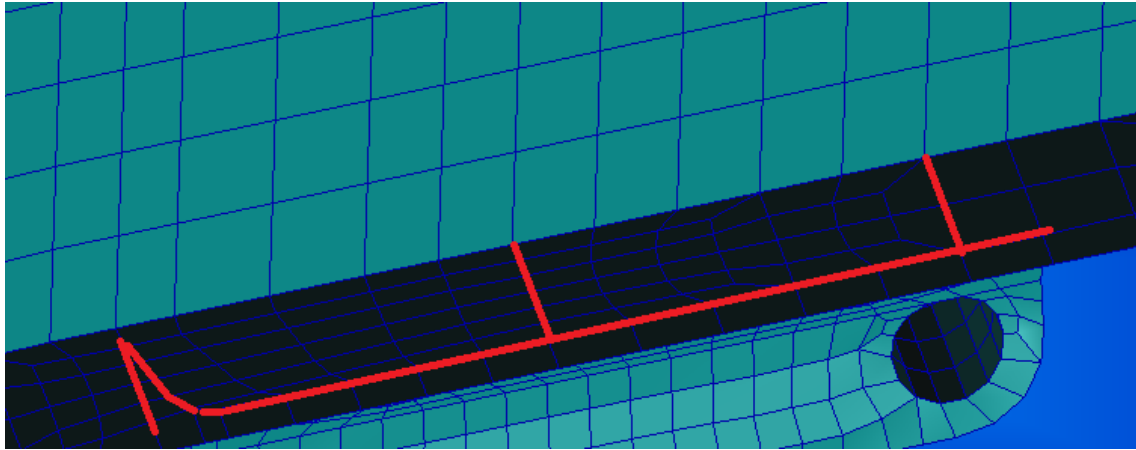


ilustración B 6

Los elementos repasados por la línea roja son fronteras de elementos necesarias debidas o bien a la existencia de nervios rigidificadores que se extruyen hacia arriba o a la unión entre el apoyo de suspensión y la llanta. Así pues respetando estos elementos se generan superficies independientes que se mallan de forma secuencial respetando las mallas contiguas mediante el elemento mesh seed. Por último, se modifican aquellos elementos que no darían un buen resultado en el cálculo de forma manual moviendo los nodos que los componen de forma manual mediante “modify-node-move”.

Así pues se puede apreciar cómo se ha conformado una malla que resuelve de una manera correcta esta serie de condiciones impuestas por la geometría del modelo.

Únicamente ha quedado un elemento triangular entre las dos líneas rojas de la izquierda que no podemos evitar debido a que el nervio que se ha de extruir hacia arriba y la zona delantera del apoyo de la suspensión convergen en un mismo punto en la llanta.

Una vez hemos mallado todos los elementos que componen el chasis del semirremolque a excepción de las cisternas queda el modelo como se aprecia en la figura que se muestra a continuación:

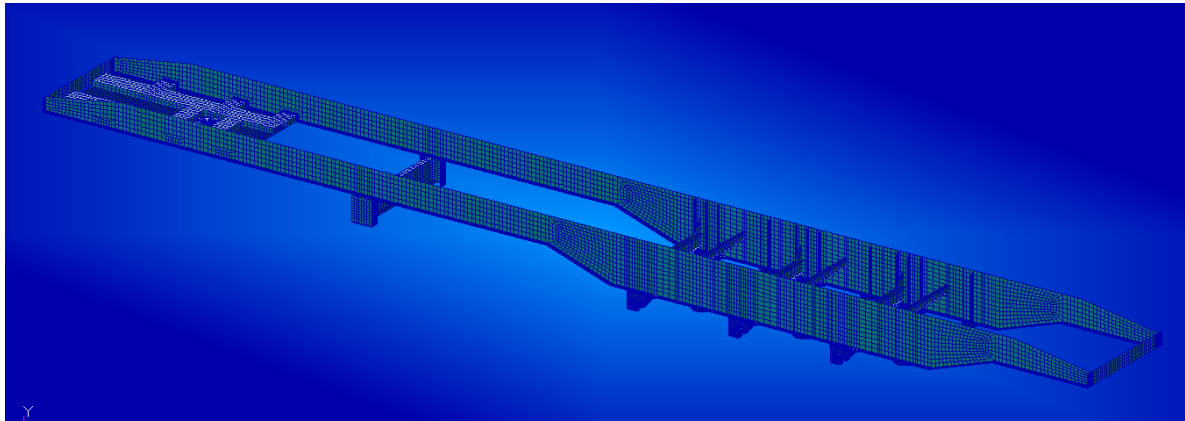


ilustración B 7

Únicamente nos queda generar los elementos que conformaran tanto la cisterna exterior como la interior, así como una conformada por elementos volumétricos que dotaremos de las propiedades de la perlita y será la que haga la función del aislante.

Para conformar la cisterna exterior se genera en primer lugar un sistema de coordenadas cilíndricas en su eje para posteriormente mediante la función “sweep-element-arc” revolucionar en torno a él los lados superiores de los elementos de la parte superior del alma de forma.

A fin de evitar una concentración de tensiones en la cisterna se realiza una llanta superior tangente a la cisterna por lo que los primeros 3 elementos hacia cada lado del alma se hacen de menor tamaño y se duplicaran para formar tanto la llanta como la cisterna exterior:

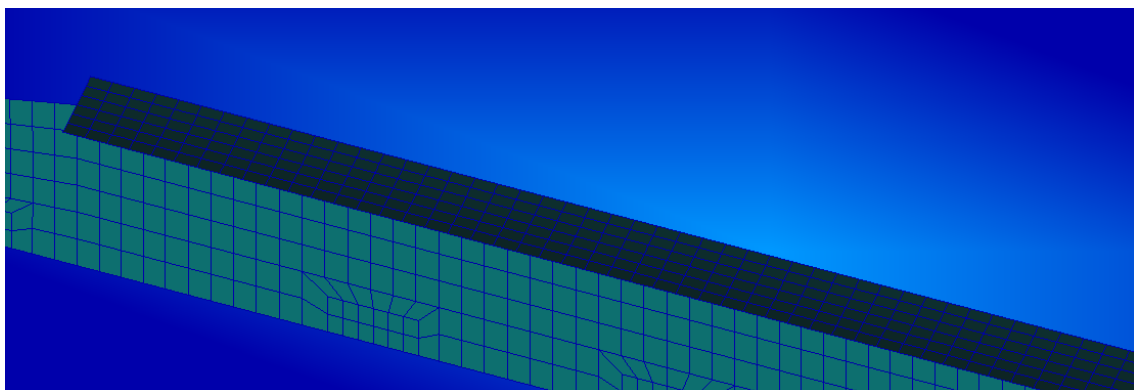


ilustración B 8

A continuación se procede a la generación completa de la cisterna por revolución:

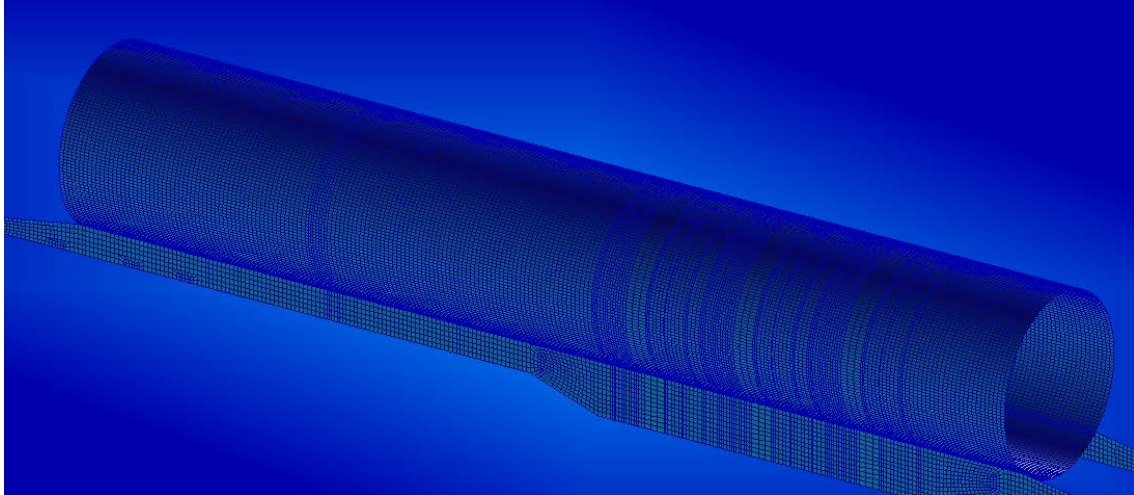


ilustración B 9

Se procede ahora a generar la pared interior de la cisterna y los elementos volumétricos que se alojan entre ambas de forma que los nodos queden coincidentes:

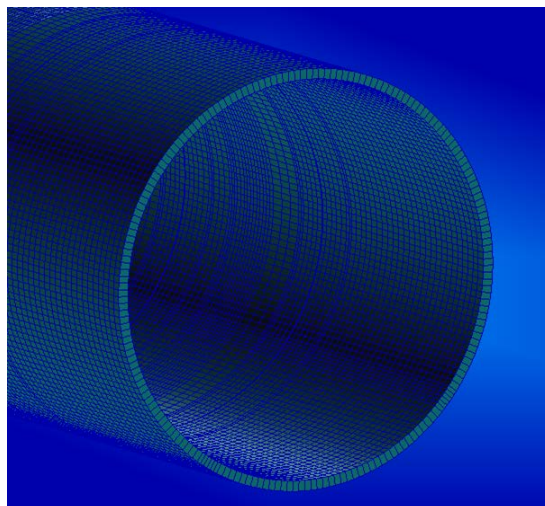


ilustración B 10

Una vez tenemos conformados los cilindros que conforman las cisternas procedemos a cerrar los extremos de las mismas mediante la generación de semiesferas. Para este propósito procederemos de la misma forma que se generaron los cilindros, partiremos de una línea curva que mallaremos mediante elementos tipo barra que posteriormente revolucionaremos para generar las semiesferas de las paredes interna y externa. Por último mediante la herramienta “sweep-element-loft” extruiremos los elementos volumétricos del aislante quedando de la siguiente manera:

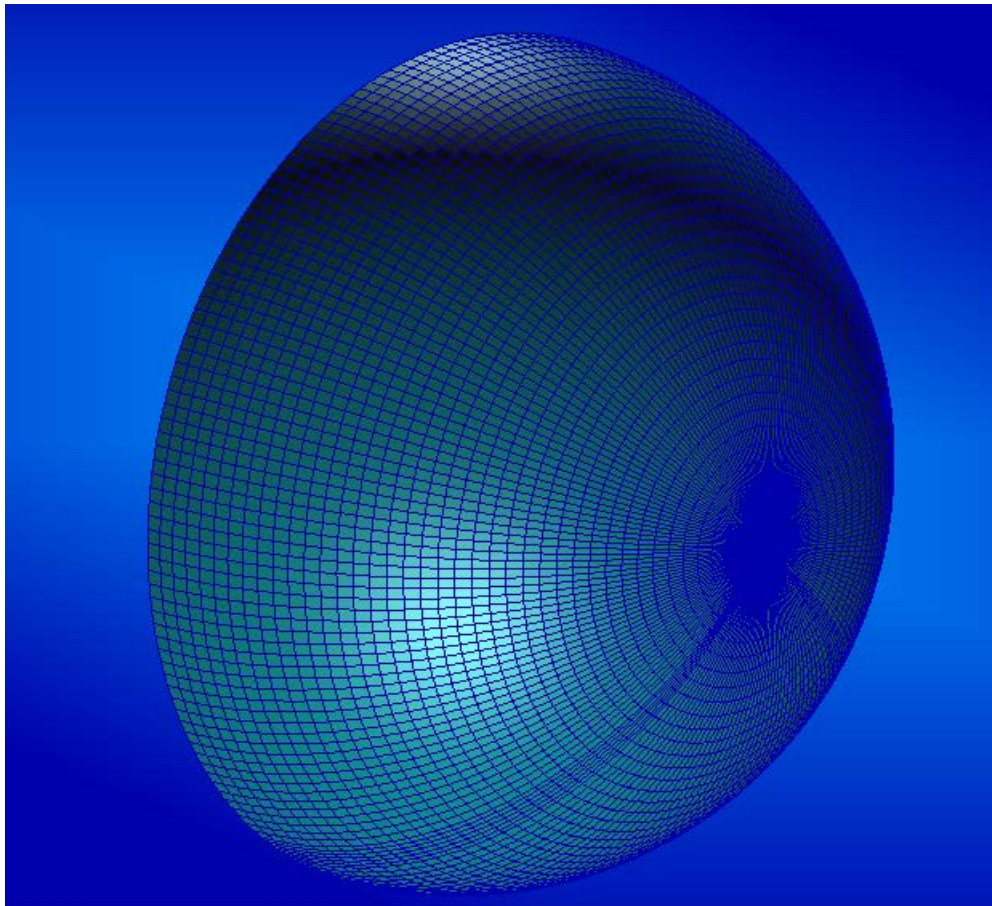


ilustración B 11

Al revolucionar los elementos para generar la esfera nos enfrentamos al problema de que al acercarnos al eje central de la cisterna los elementos tienden a ser cada vez más pequeños hasta el punto de que nos van a generar graves problemas de tensiones en el procesado, puede apreciarse mejor en la siguiente figura:

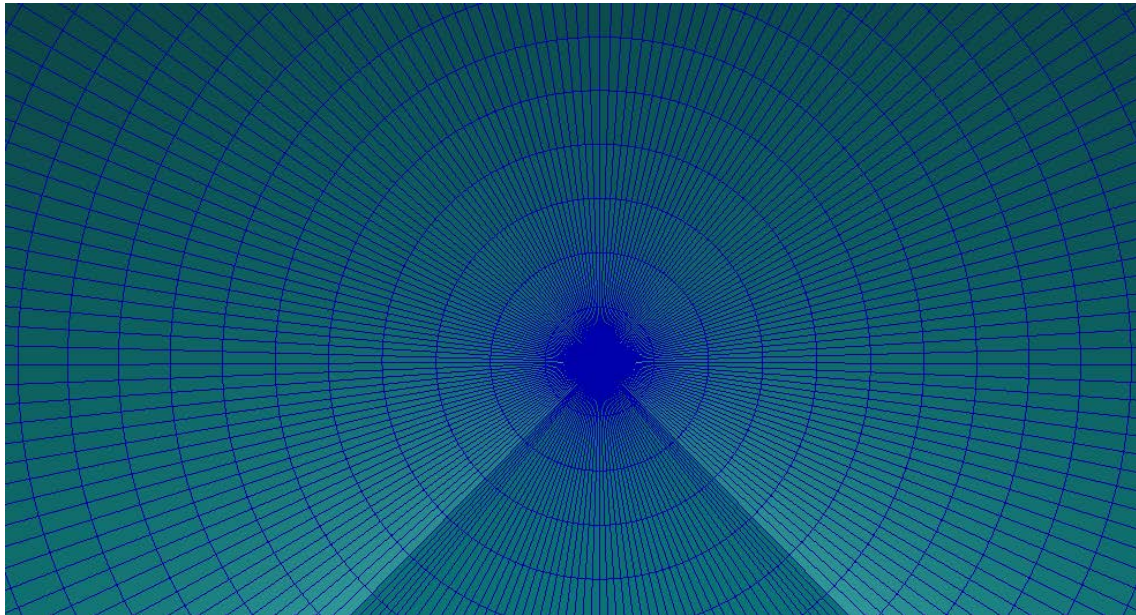


ilustración B 12

Para solventar este problema se elimina la malla de los últimos círculos concéntricos causantes de problemas en el cálculo y creamos una superficie que dividimos en cuatro cuartos para ir realizando la malla de forma manual mediante “isomesh” hasta conseguir la siguiente solución final:

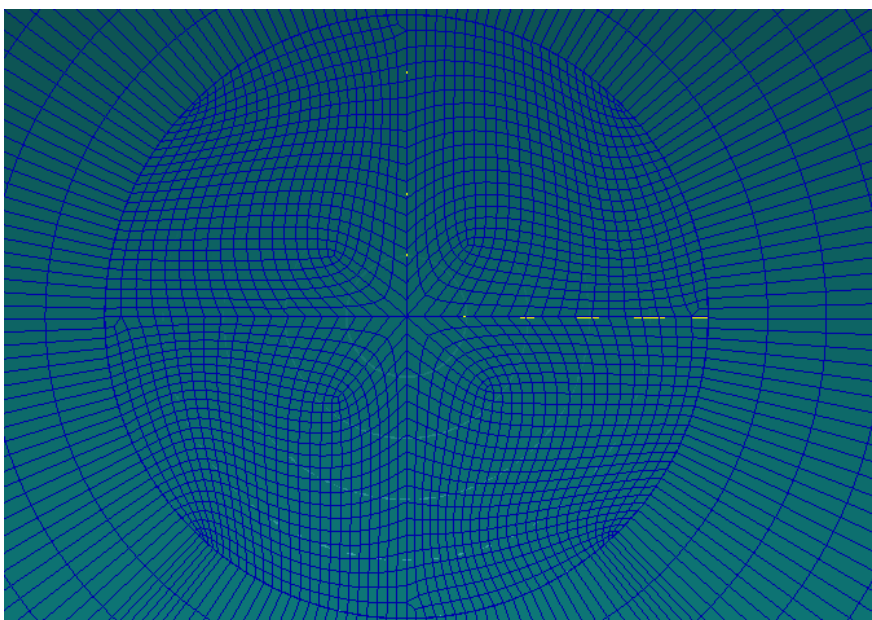


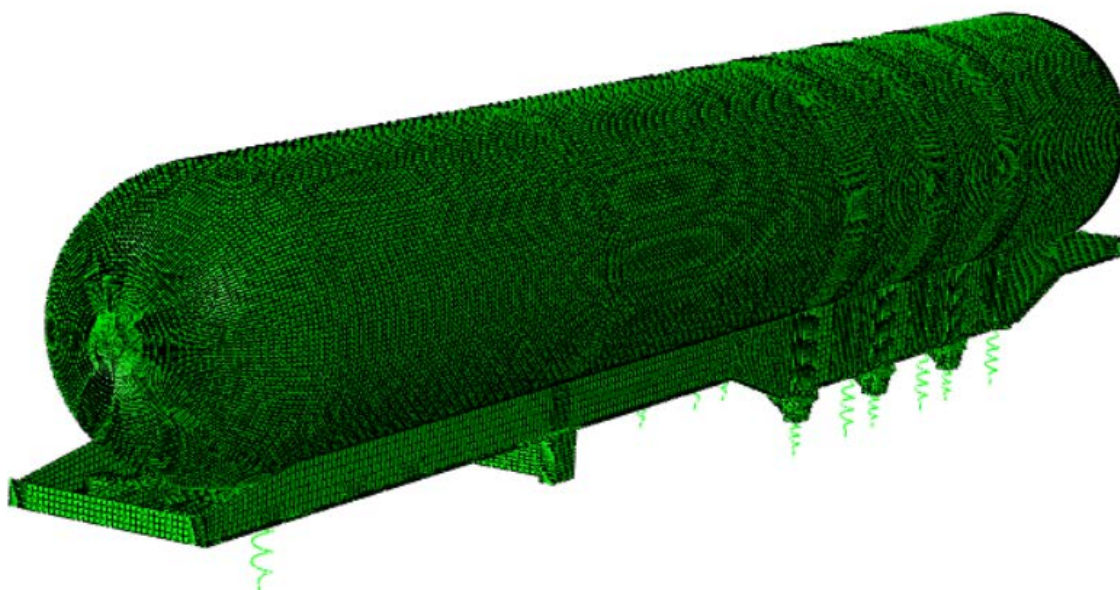
ilustración B 13

En este proceso cabe destacar la importancia de generar las mallas de la misma forma en ambas esferas (interior y exterior) para posteriormente poder extruir los elementos volumétricos mediante la herramienta “loft”.

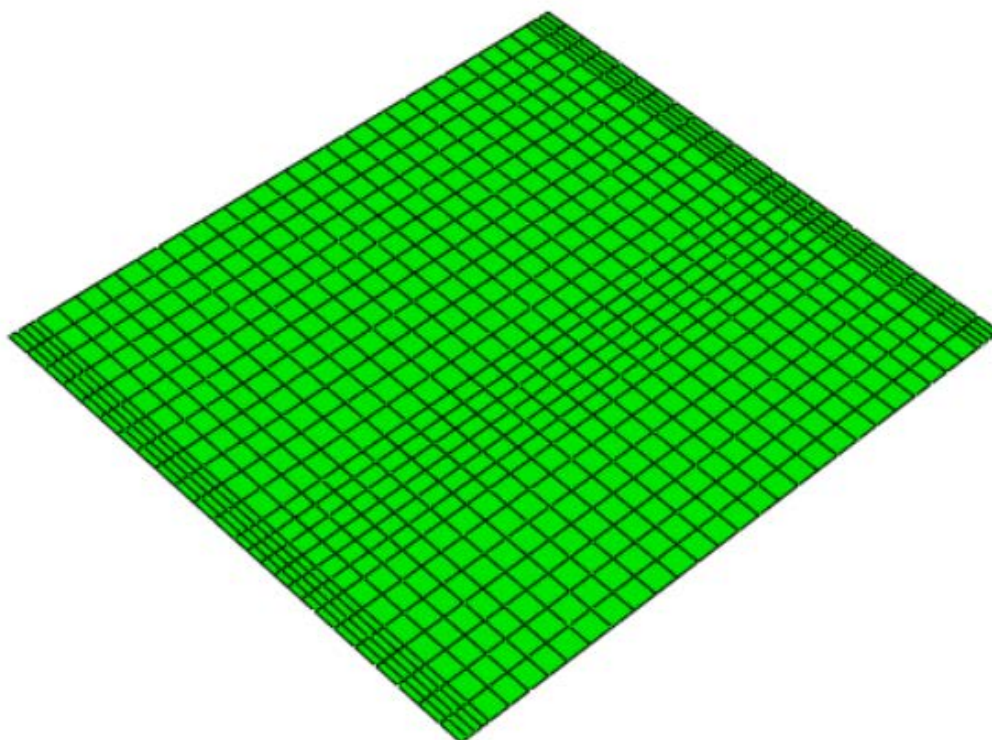
A continuación se generaran el resto de elementos solidos del modelo como son el King Pin, los ejes de las ruedas o los refuerzos de los apoyos de la suspensión mediante extrusión de los elementos tipo Shell.

Por último se generarán los materiales a utilizar; el acero S355 y la perlita para posteriormente asignar propiedades a cada elemento de la malla así como el espesor correspondiente para cada elemento tipo Shell.

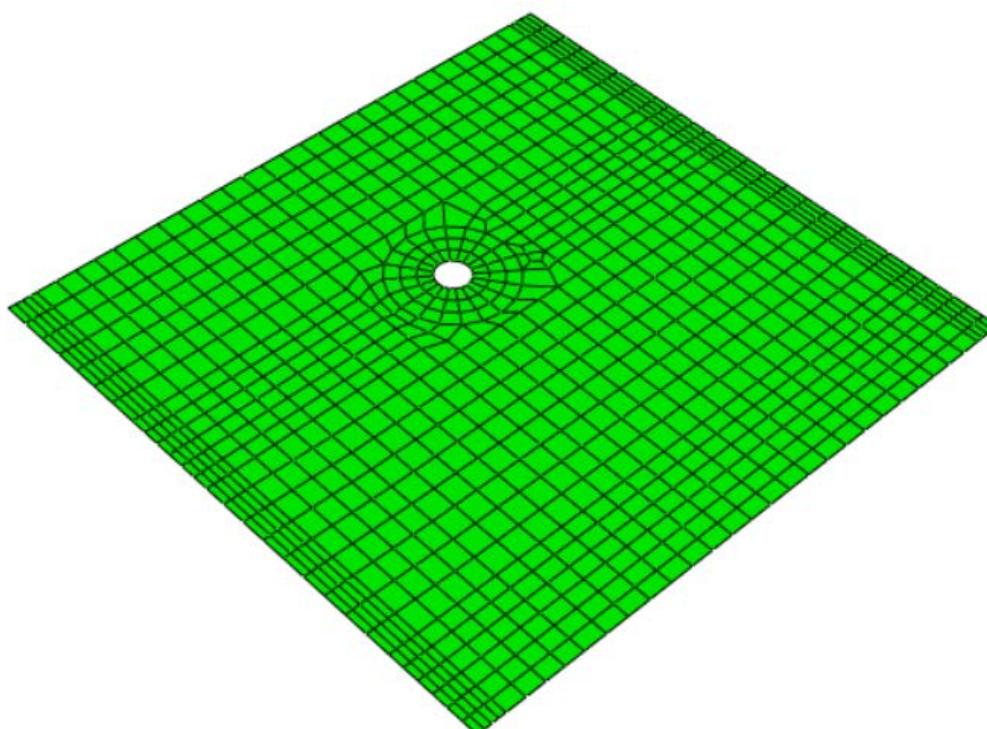
ANEXO C: ESTRUCTURA DEL SEMIRREMOLQUE. DESPIECE DE COMPONENTES



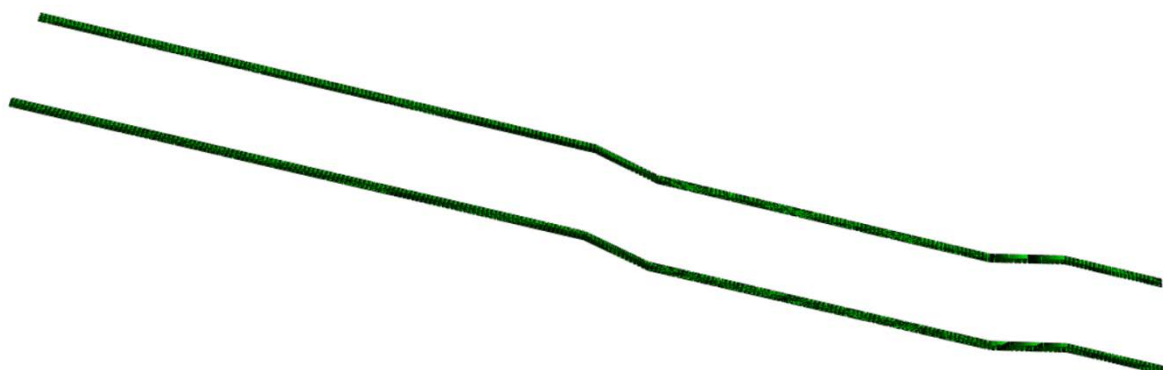
➤ Chapa de deslizamiento:



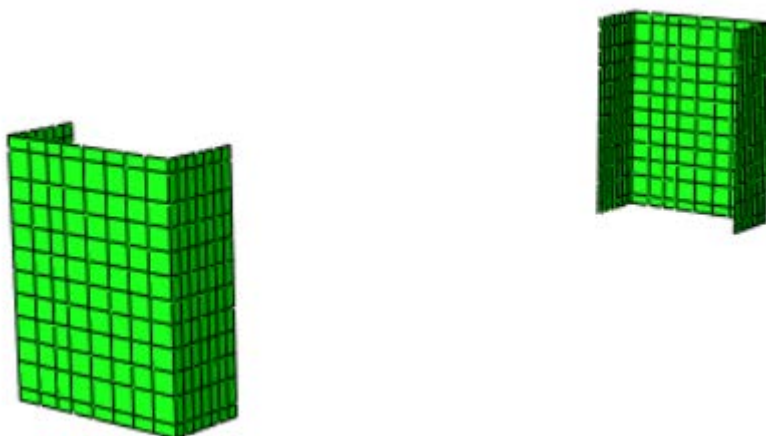
➤ Chapa King-pin:



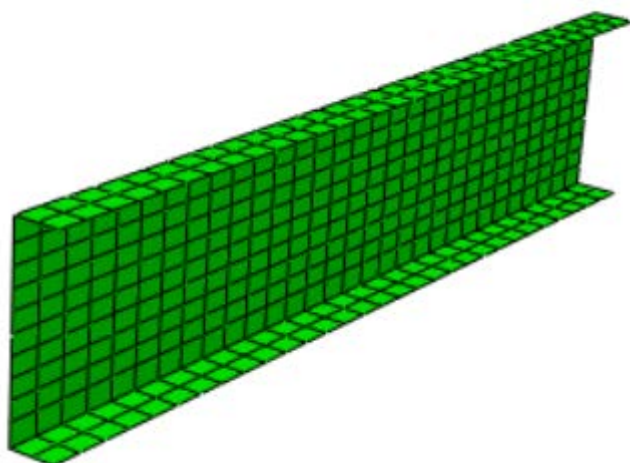
➤ Llanta inferior:



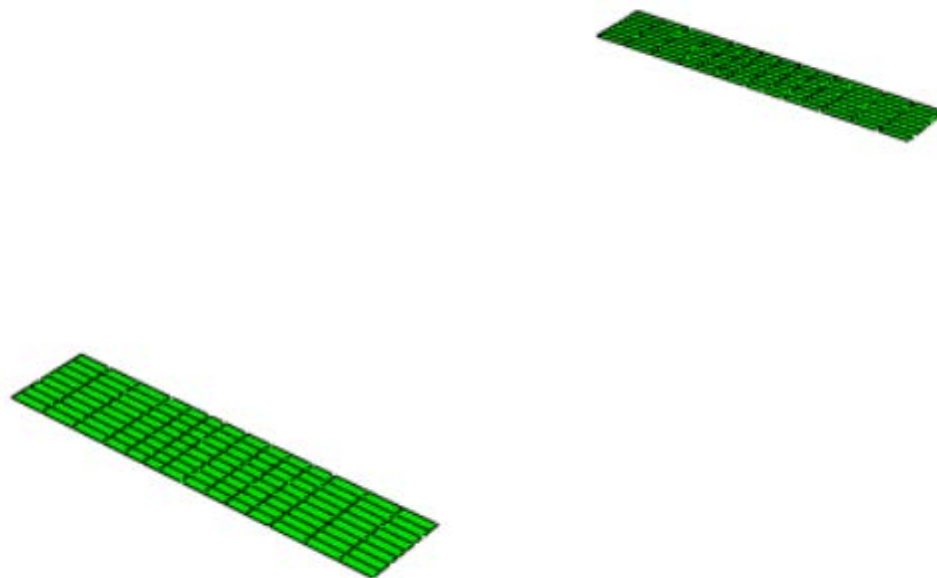
➤ Soporte estacionamiento:



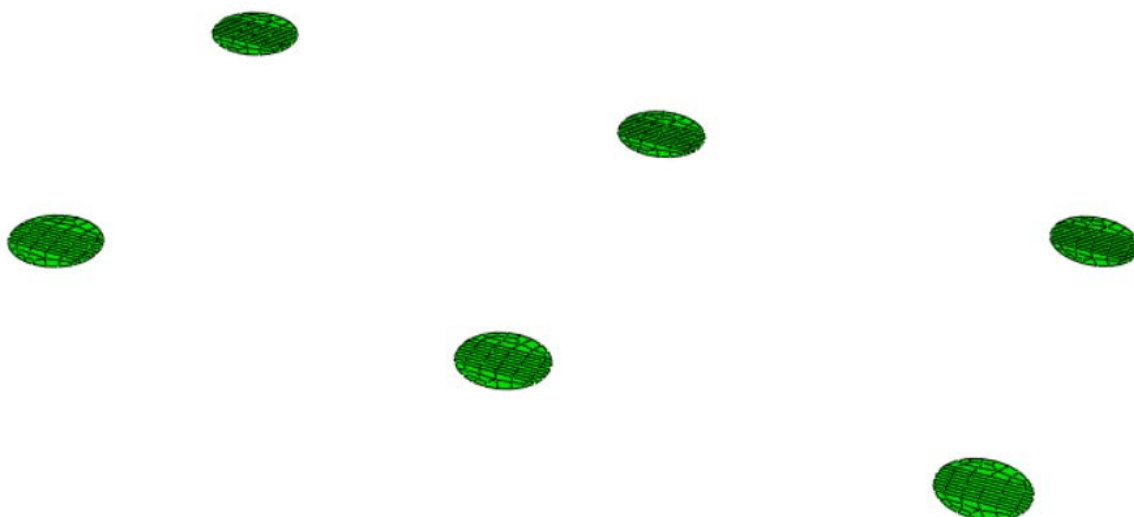
➤ Viga estacionamiento:



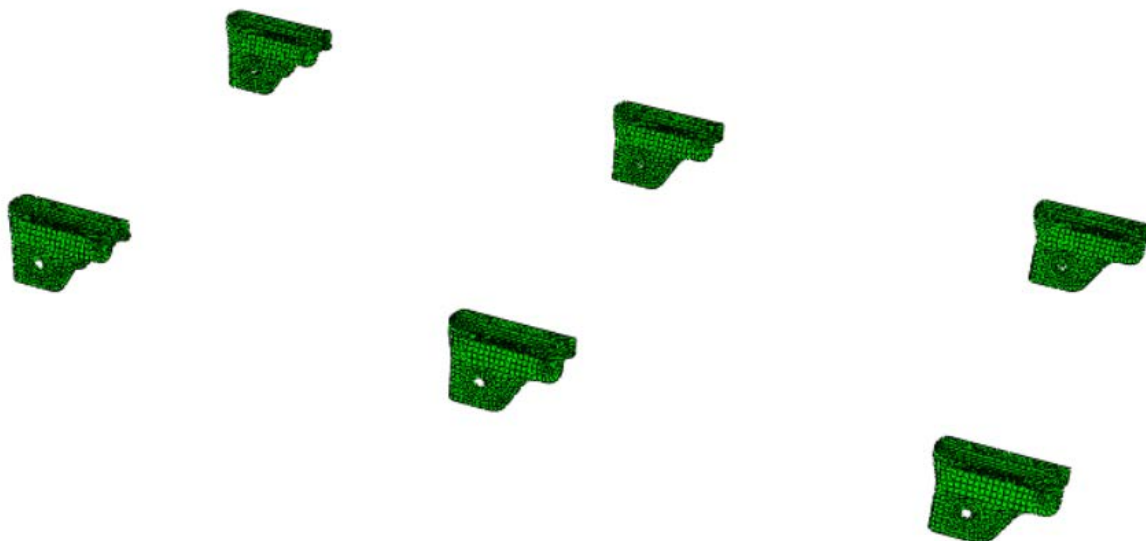
- Refuerzo de llanta sobre soporte de estacionamiento:



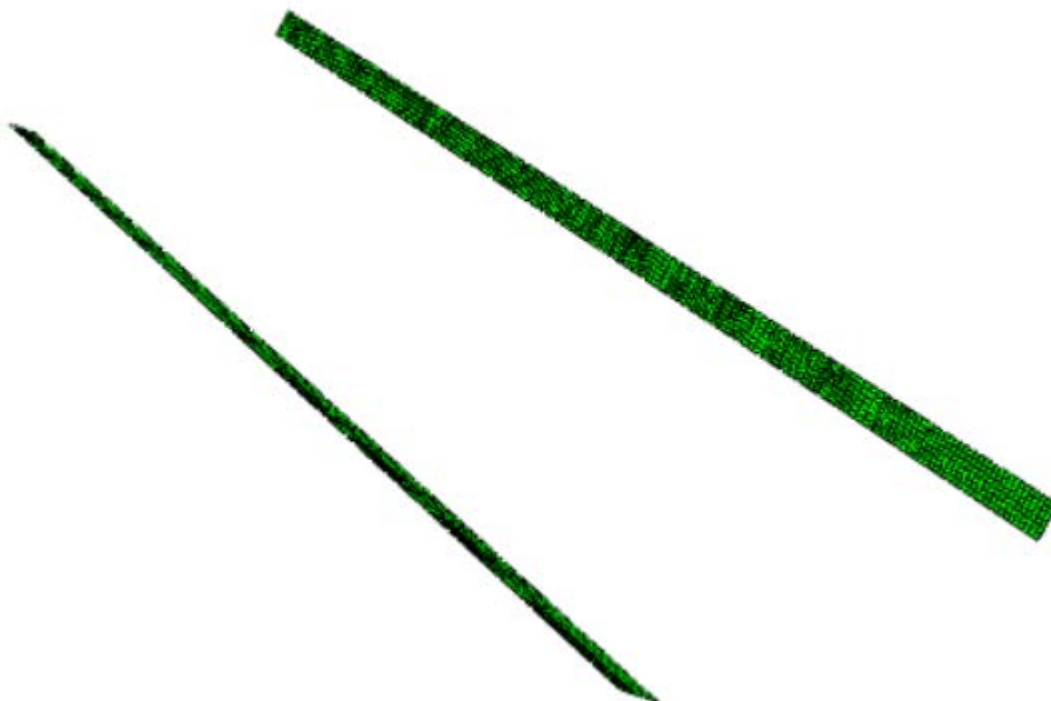
- Soportes diapress:



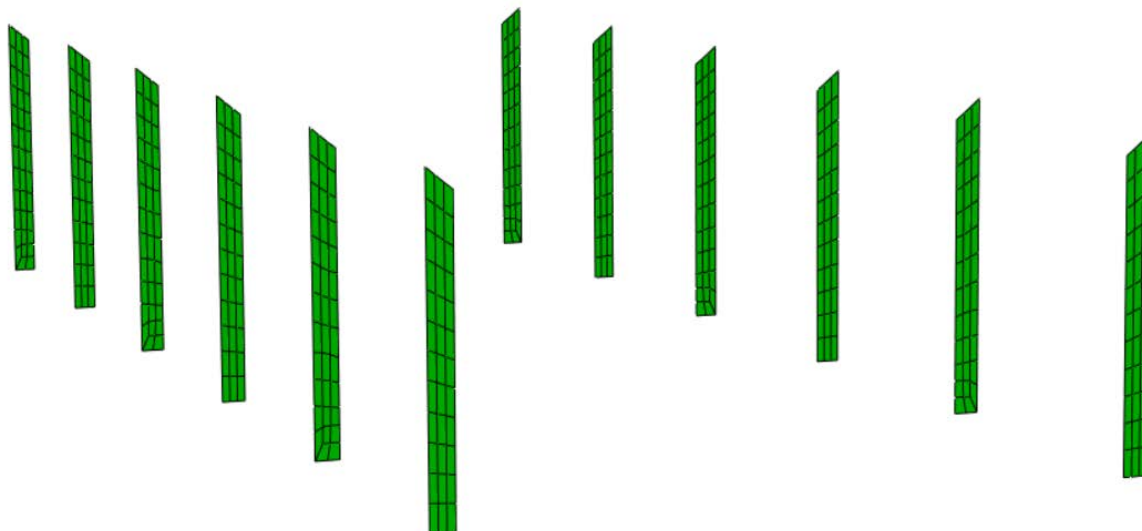
➤ Soportes de suspensión:



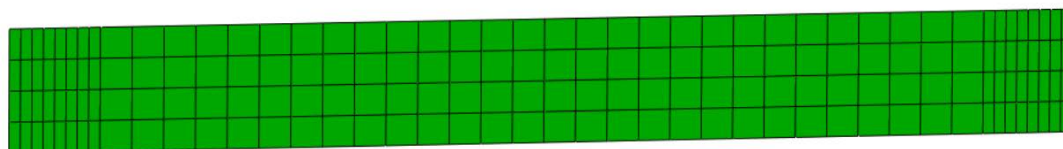
➤ Llantas superiores:



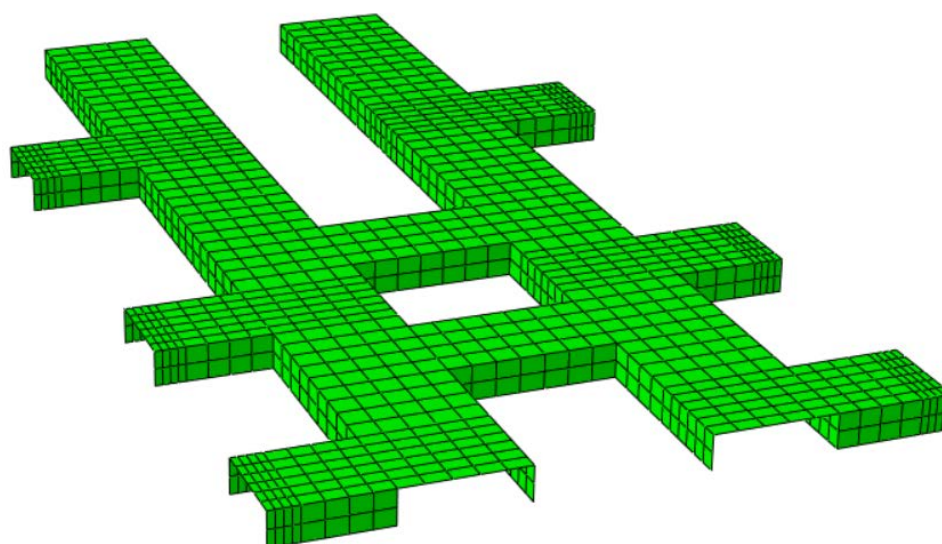
➤ Nervios rigidificadores:



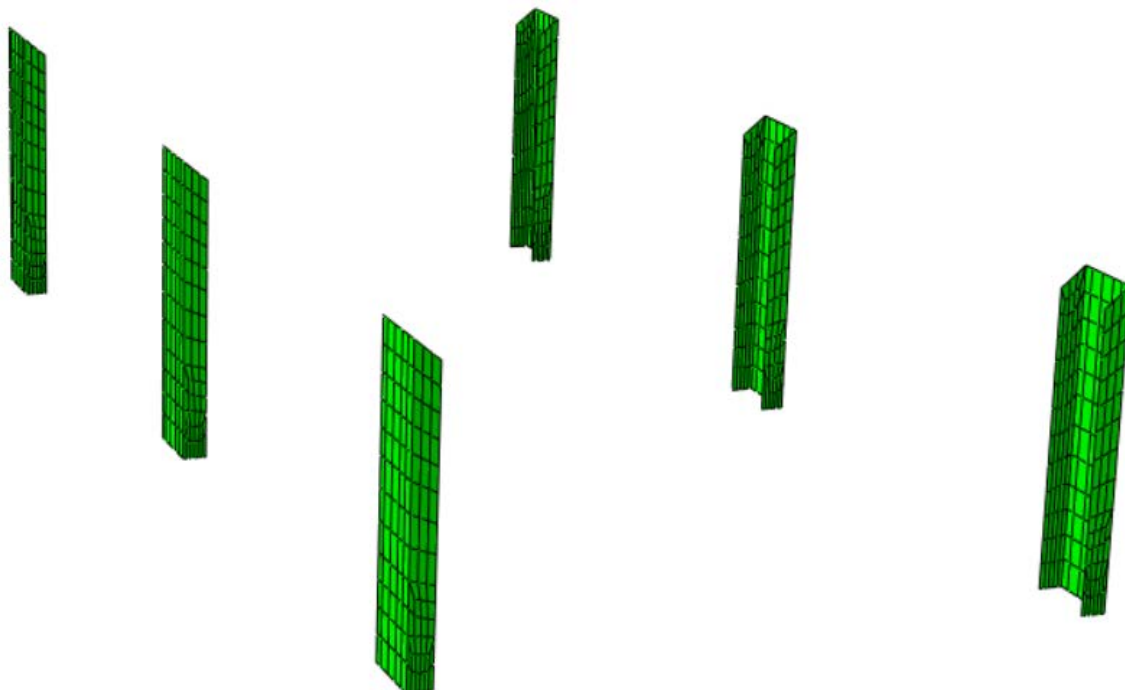
➤ Chapa de cierre delantero y trasero:



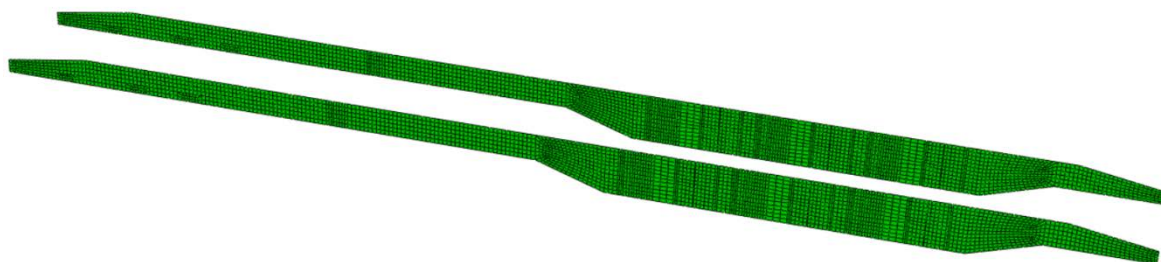
➤ Us rigidificadoras delanteras:



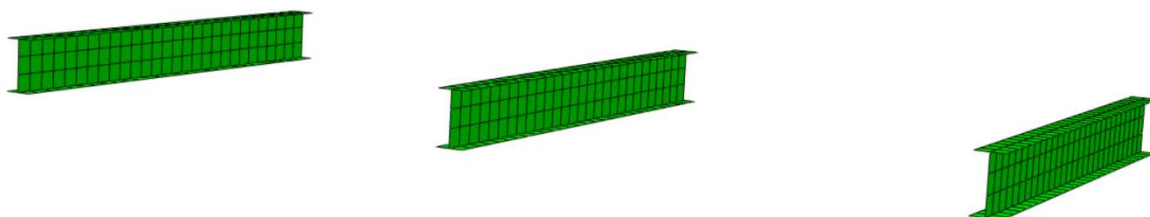
- Us rigidificadoras suspensión:



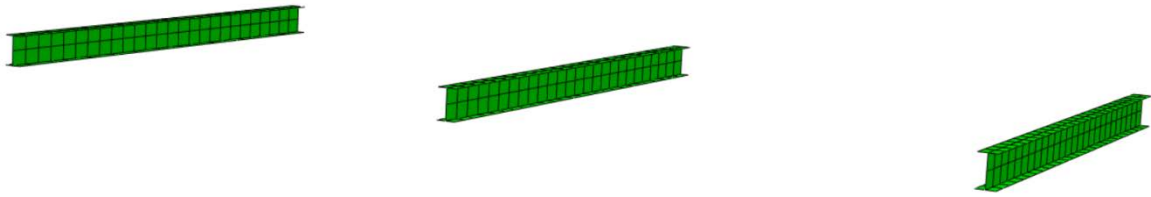
- Almas de los largueros:



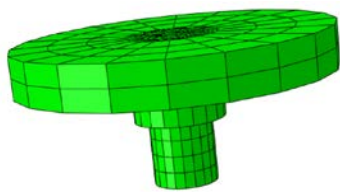
- Vigas de suspensión:



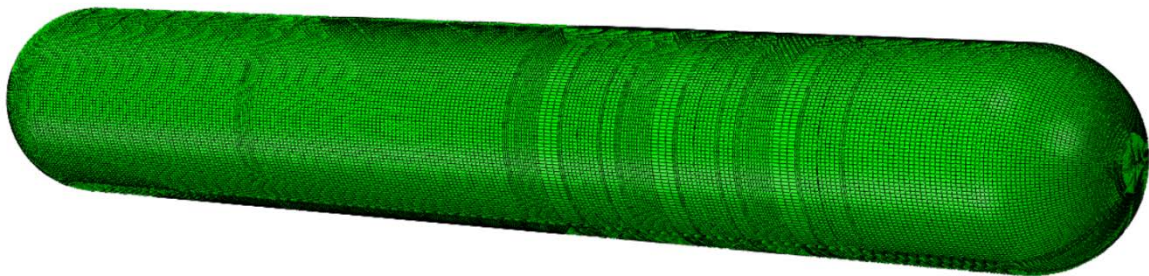
➤ Travesaños :



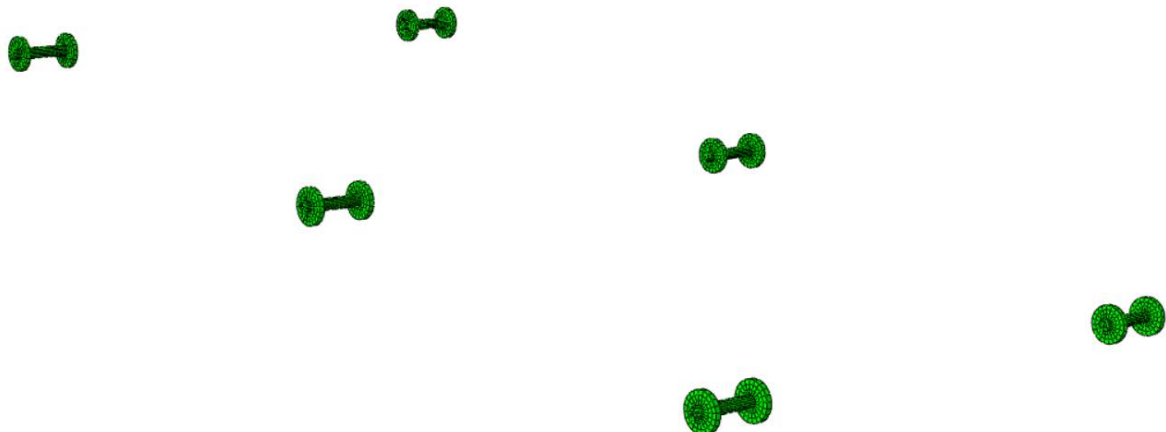
➤ King-pin:



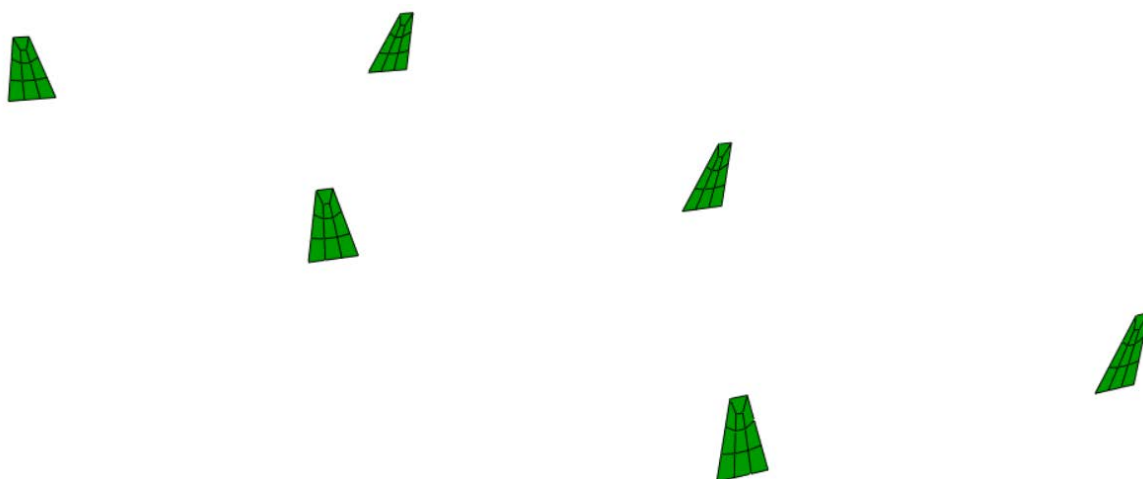
➤ Cisternas: Interior y exterior tipo Shell, intermedia tipo volumétrica. (Apariencia en imagen idéntica)



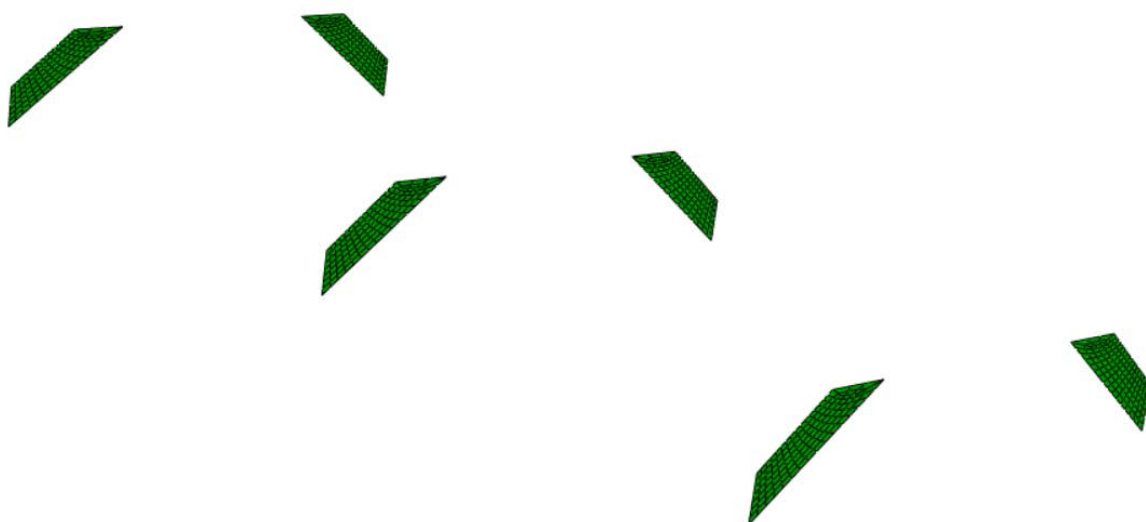
➤ Bulones y refuerzos del soporte de suspensión:



➤ Escuadras rigidificadoras superiores:



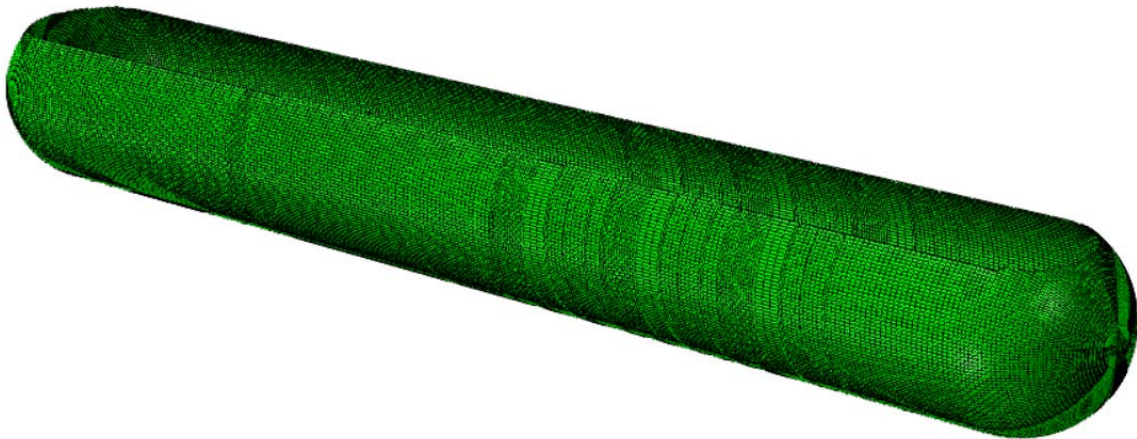
➤ Escuadras rigidificadoras inferiores:



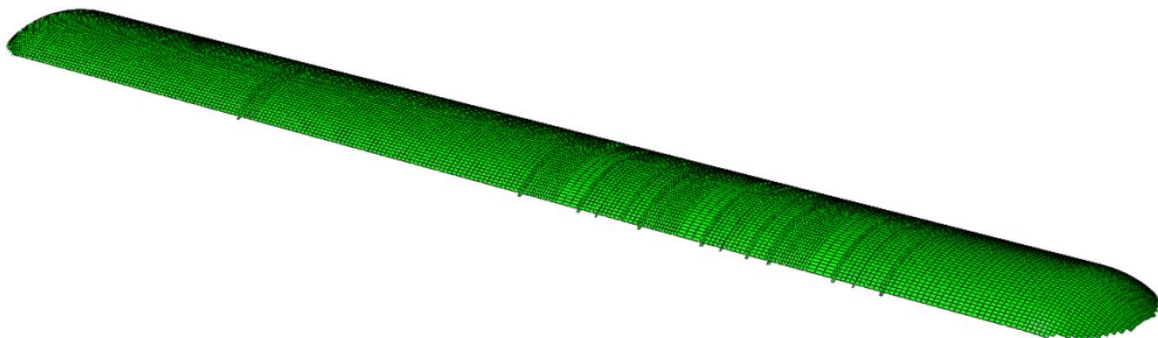
➤ Muelles:



➤ Conjunto de elementos de la cisterna interior para aplicación de presión hidrostática:



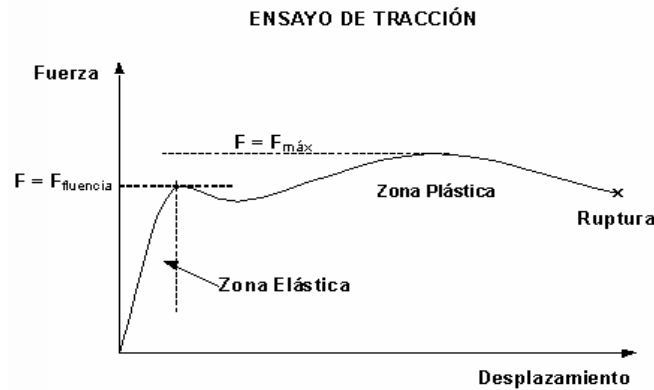
➤ Conjunto de elementos de la cisterna interior para aplicación de presión uniforme:



ANEXO D: MATERIALES: CURVA TENSIÓN- DEFORMACIÓN

Para caracterizar el comportamiento plástico de los acero empleados, se recurre a la curva tensión-deformación (σ - ϵ), incluyendo el punto de rotura. Estas curvas se obtienen a partir de ensayos normalizados de tracción.

En la siguiente figura, se puede observar el aspecto de una curva característica tensión-deformación para acero:



Curva típica de ensayo de tracción

Las curvas poseen una primera región, llamada zona elástica, donde la probeta se comporta como un muelle elástico, de forma que, al retirar la carga, la probeta regresa a su posición inicial. Para esta región se cumplirá que:

$$F = K (L - L_0)$$

Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material está llegando a su límite de fluencia o límite elástico, y empieza a deformarse de forma permanente. No se cumple ya la relación anterior.

Tras el límite de fluencia empieza una región inestable que es distinta para cada acero. En esa región está el punto en el que se alcanza la fuerza máxima, instante en el cual se forma un cuello en la probeta.

En este caso se define la resistencia a fluencia como:

$$\sigma_{yp} = \frac{F_{yp}}{A_0}$$

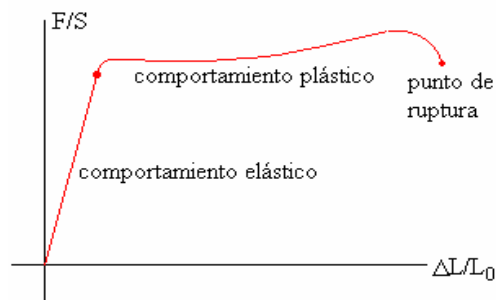
La resistencia a tracción será:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{max}}{A_0}$$

La deformación unidimensional se define como:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Con esto y a partir de las curvas Fuerza-Desplazamiento obtendremos las curvas Esfuerzo-Deformación, parecidas a la siguiente:

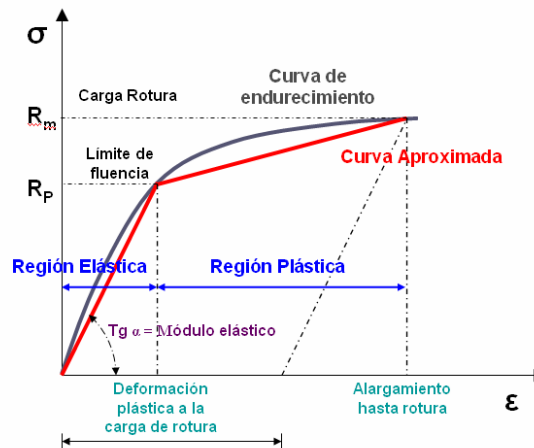


En la región elástica de la curva se cumplirá que:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

A partir de esta ecuación se obtendrán los puntos de plastificación y de rotura del material.

Estas curvas no se pueden introducir en Abaqus tal cual las hemos descrito, con lo que habrá que reducir la curva a dos pendientes, la primera corresponde al módulo de Young, la segunda a la zona plástica y dos puntos, que son el límite de fluencia del material y el límite de rotura.



La deformación plástica a la tensión de ruptura se calcula como:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_t R_m / E$$

donde ε_p es la deformación plástica, ε_t es la deformación total, E es el módulo de Young y R_m es la carga de rotura.

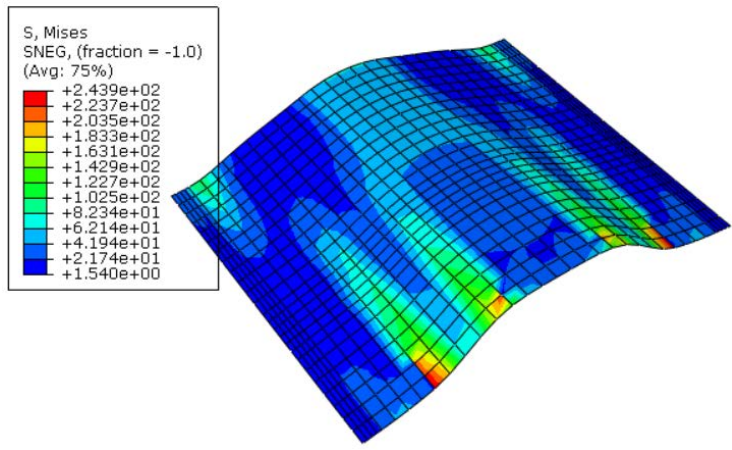
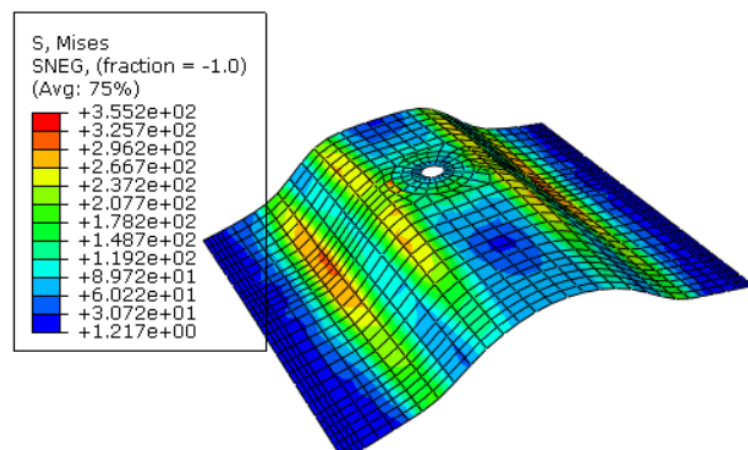
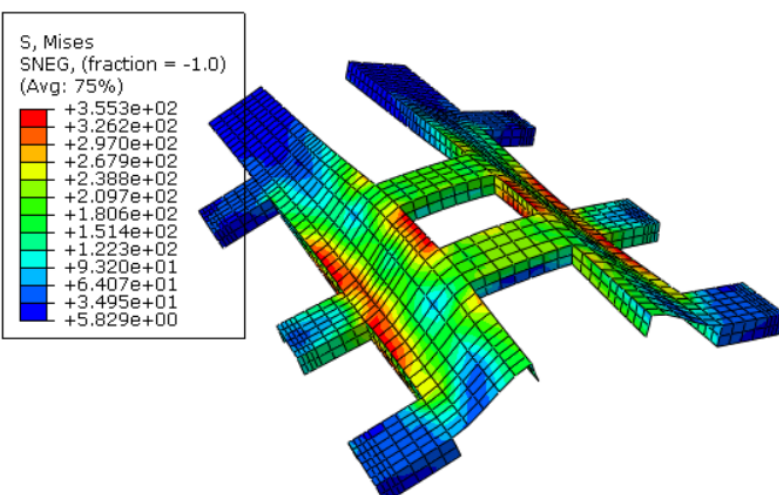
ANEXO E: RESULTADOS

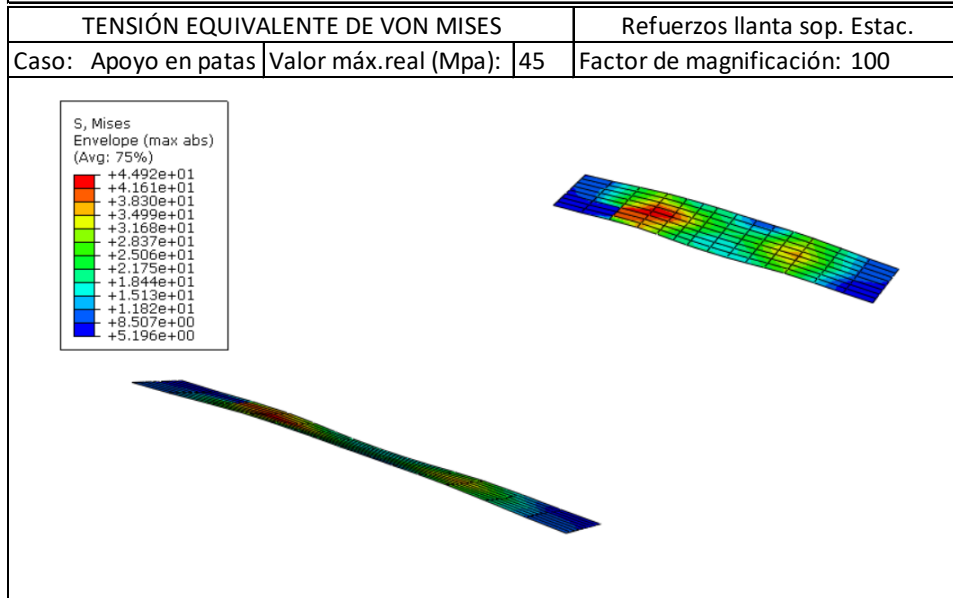
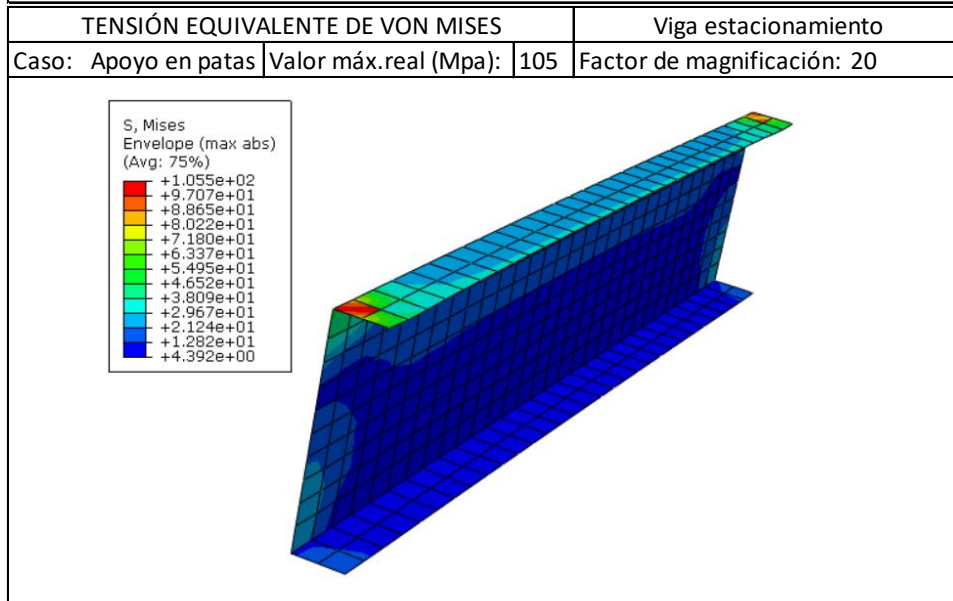
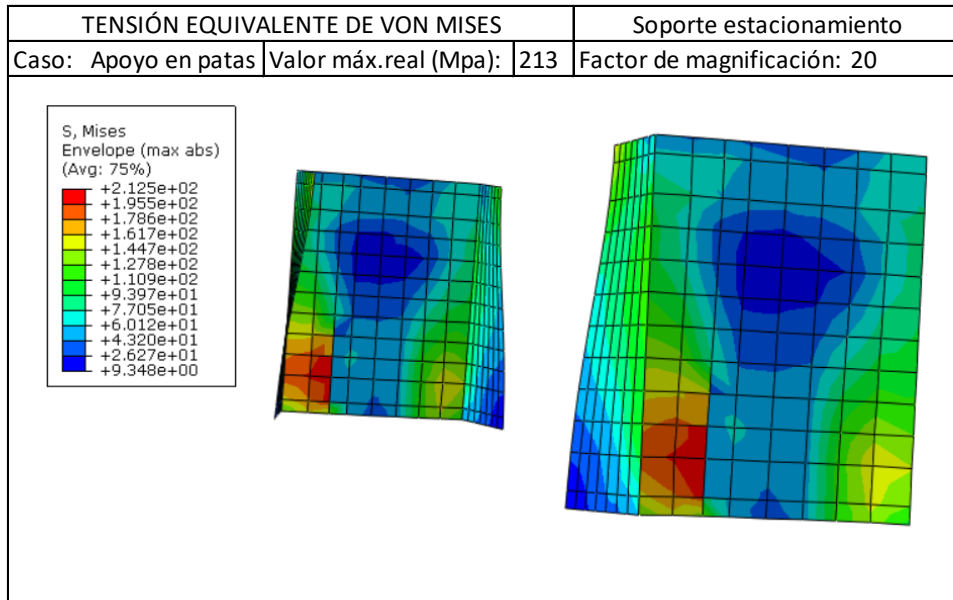
E.1 RESULTADOS MODELO INICIAL

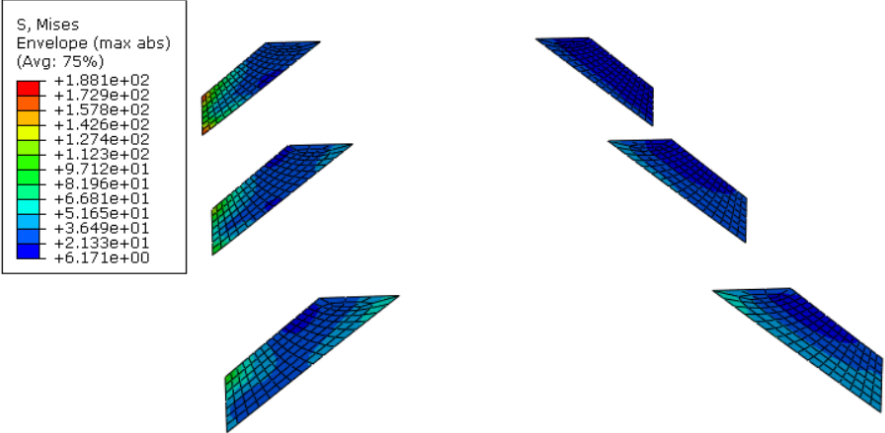
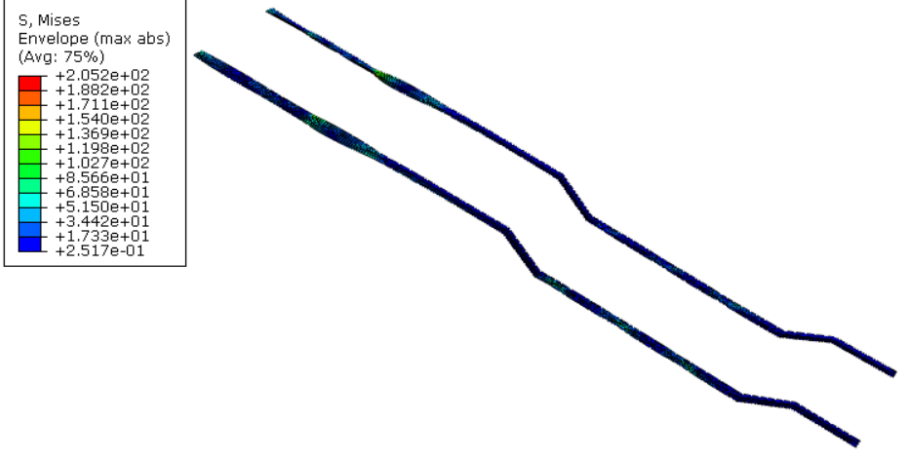
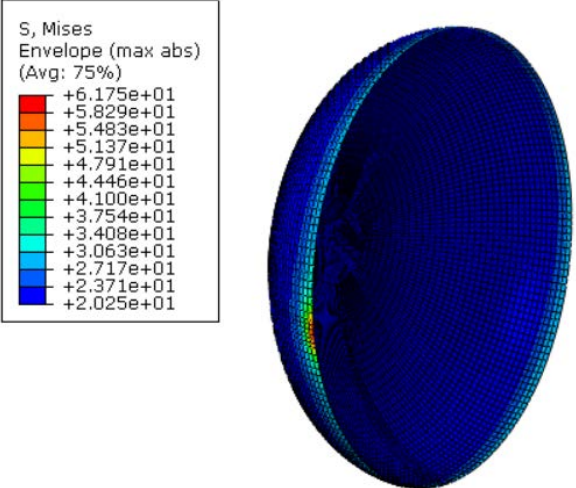
E.1.1 TABLA RESUMEN

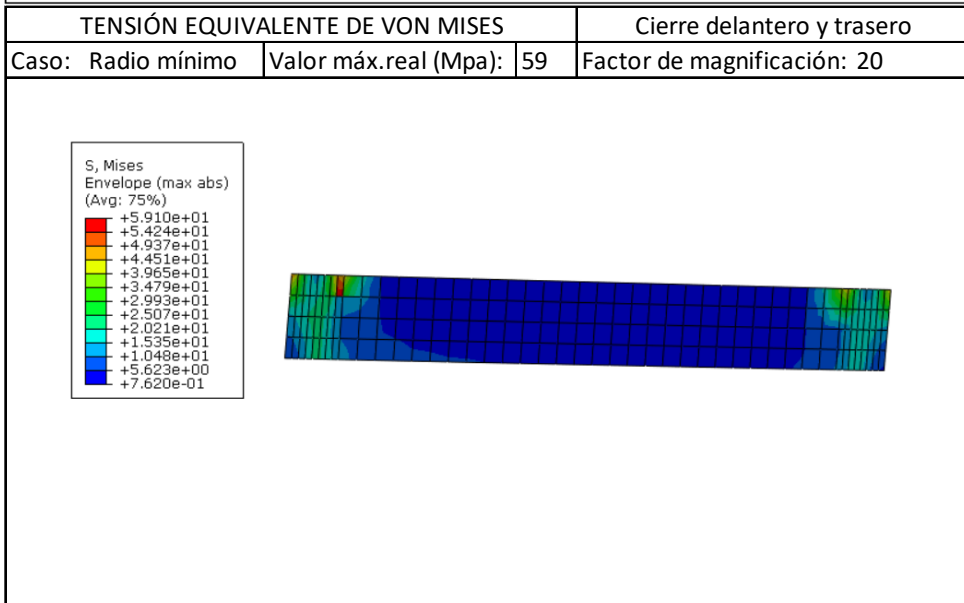
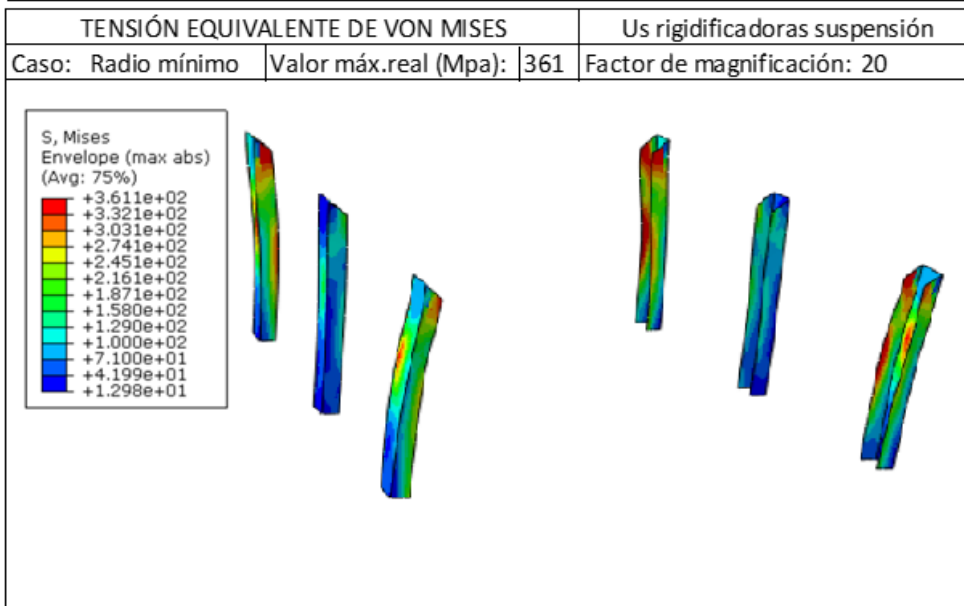
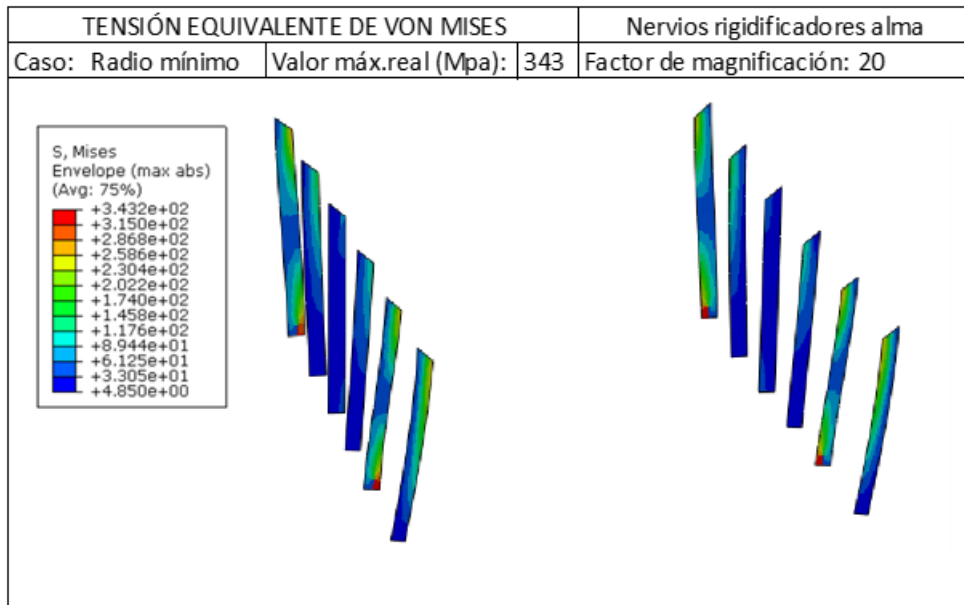
Caso:		MÁXIMO		ESTÁTICO		APOYO PATAS		FRENADO		CURVA		RADIO MÍNIMO	
RESULTADO CALCULOS PRIMER MODELO	Material	Espesor(mm.)	Peso (KG.)	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS
Chapa deslizamiento	355	5	57,8	244	1,455	186	1,909	2	177,500	244	1,455	188,6	1,882
Chapa Kingpin	355	8	97,9	335	1,060	275	1,291	4	88,750	335	1,060	288,6	1,230
Cierre delantero y trasero	355	5	18	59	6,017	72	4,931	1,6	221,875	7,5	47,333	57	6,228
U delanteras	355	5	98,8	356	0,997	330	1,076	5,4	65,741	356	0,997	355,3	0,999
SopORTE estacionamiento	355	6	14,5	213	1,667	5	71,000	213	1,667	7,4	47,973	73,2	4,850
Viga estacionamiento	355	4	19,4	105,5	3,365	2,4	147,917	105,5	3,365	2,6	136,538	61,4	5,782
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	355	12	12,6	45	7,889	7,3	48,630	45	7,889	10	35,500	33	10,758
Nervios	355	8	19,8	343,2	1,034	1,3	273,077	10,6	33,491	31	11,452	78	4,951
U rigidificadoras suspensión	355	5	33	361,1	0,983	31	11,452	45	7,889	81,5	4,356	228,3	1,555
Alas viga suspensión	355	6,9	29,8	165,1	2,150	3,4	104,412	4,5	78,889	10,6	33,491	67,4	5,267
Almas viga suspensión	355	4,7	20	159,2	2,230	4,8	73,958	5,8	61,207	9,8	36,224	63,3	5,608
Alas travesaño	355	4,2	11,75	100,5	3,532	1,3	273,077	2	177,500	2,3	154,348	29,2	12,158
Almas travesaño	355	3,3	7,8	30,9	11,489	0,7	507,143	0,9	394,444	1,9	186,842	8,9	39,888
Escuadra rigidificadora superior	355	10	7,3	190,3	1,865	4	88,750	5	71,000	5,9	60,169	73,6	4,823
Escuadra rigidificadora inferior	355	12	14	188,1	1,887	3,7	95,946	5,4	6,574	90	3,944	188,1	1,887
Llanta superior	355	12	258,7	274,2	1,295	23	15,435	28,5	12,456	27	13,148	118,9	2,986
Llanta inferior	355	12	305,3	205	1,732	71,6	4,958	46	7,717	95	3,737	205	1,732
Almas largueros	355	6	516,3	356,4	0,996	85,3	4,162	73,7	4,817	115	3,087	309	1,149
Cilindro exterior	355	5	2794,5	235	1,511	47	7,553	48,6	7,305	46,8	7,585	163	2,178
Cilindro interior	355	5	2653,4	159,3	2,228	59	6,017	63,5	5,591	61	5,820	107	3,318
Semiesferas interiores	355	5	432,9	41	8,659	38,1	9,318	37,8	9,392	40,6	8,744	40,8	8,701
Semiesferas exteriores	355	5	480,2	61,7	5,754	42,3	8,392	46,4	7,651	39	9,103	61,7	5,754
Cisterna perifita (volumétrica)	0,4		521,8	0,3	1,333	0,3	1,333	0,3	1,333	0,3	1,333	0,3	1,333

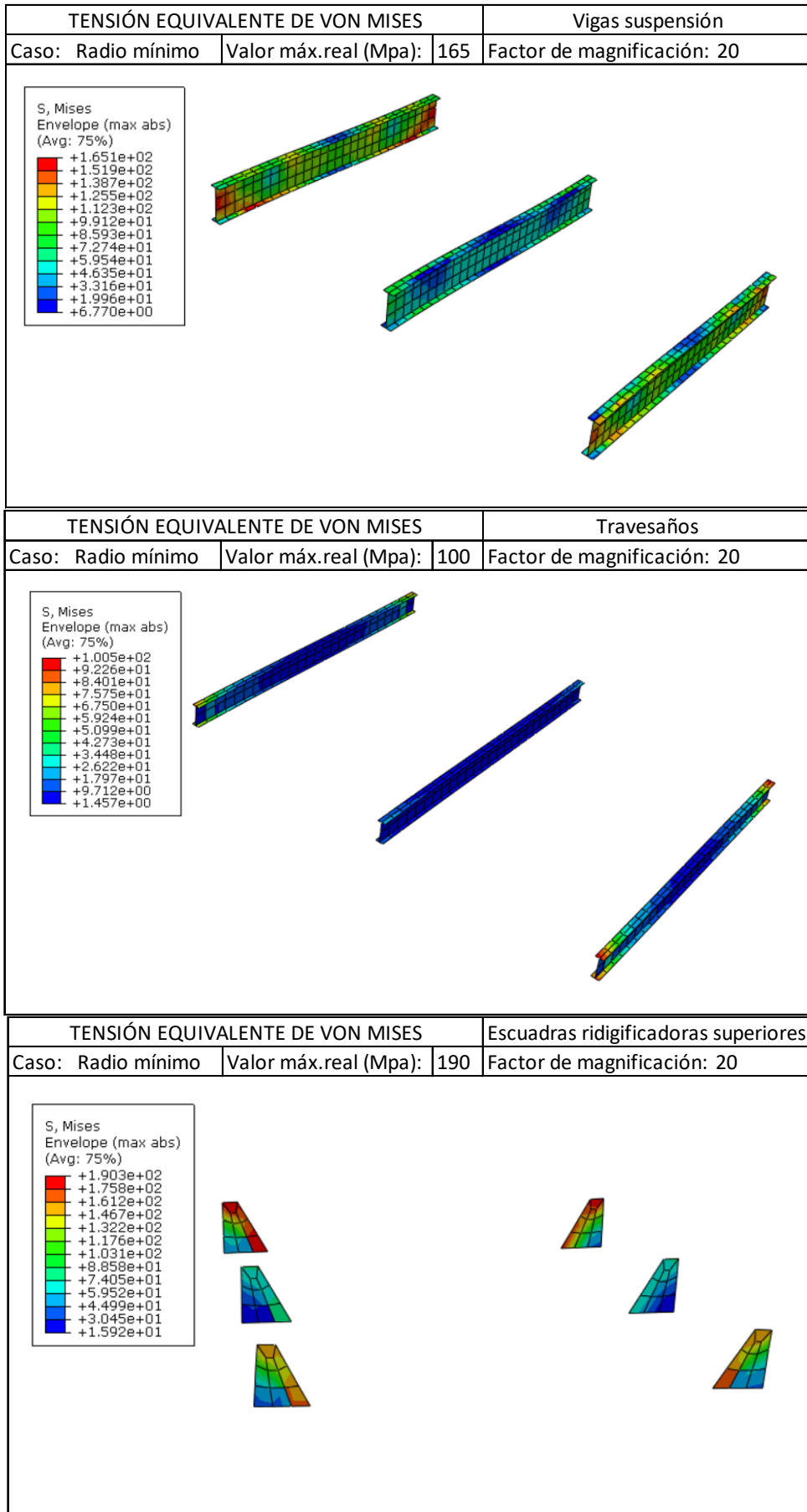
E.1.2 TENSIONES EQUIVALENTES DE VON MISES POR COMPONENTE:

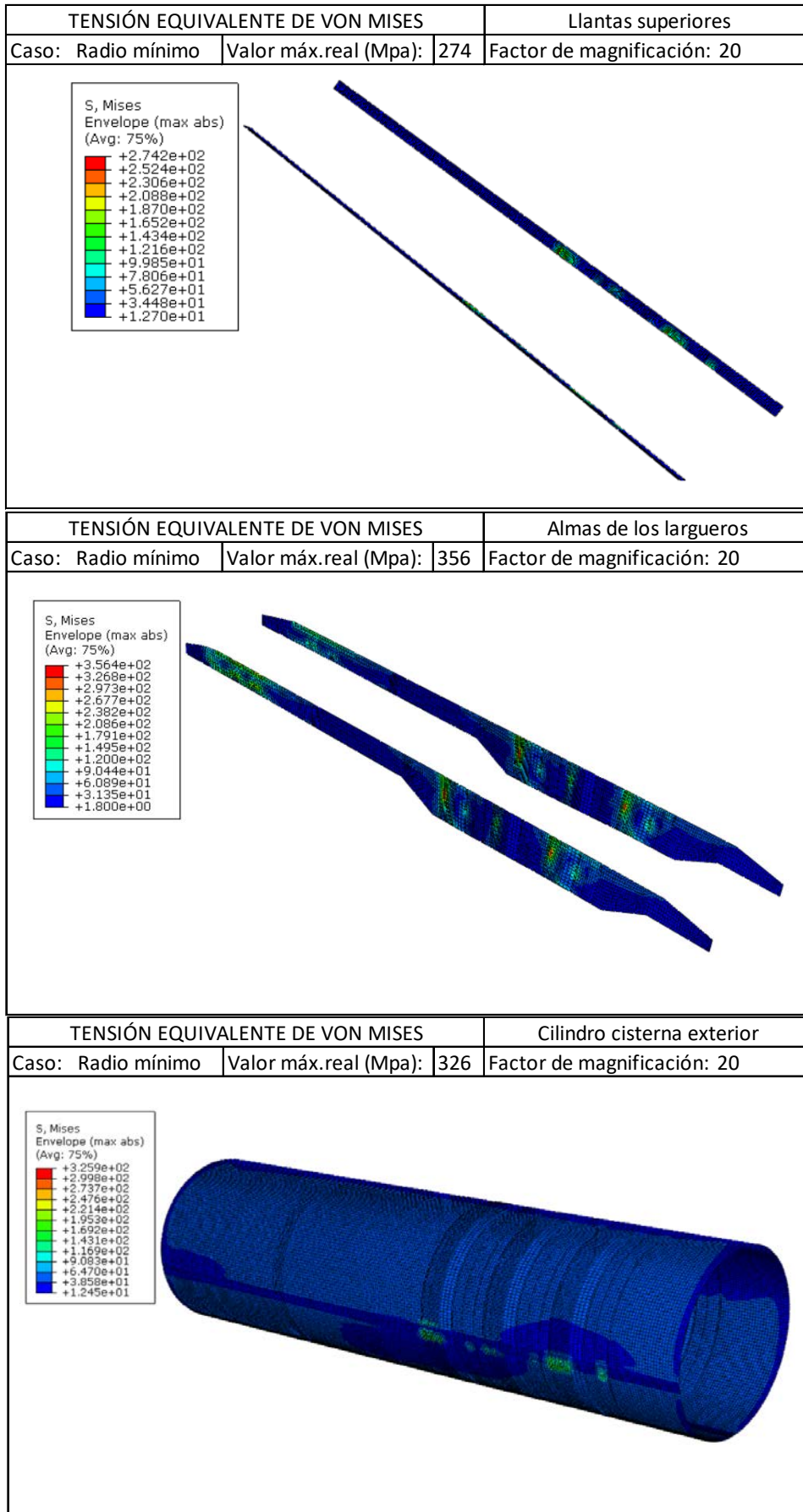
TENSION EQUIVALENTE DE VON MISES		Chapa deslizamiento	
Caso: Frenado	Valor máx.(Mpa): 244	Factor de magnificación: 20	
			
TENSION EQUIVALENTE DE VON MISES		Chapa King-pin	
Caso: Frenado	Valor máx.real (Mpa): 335	Factor de magnificación: 20	
			
TENSION EQUIVALENTE DE VON MISES		Us delanteras	
Caso: Frenado	Valor máx.real (Mpa): 355	Factor de magnificación: 20	
			

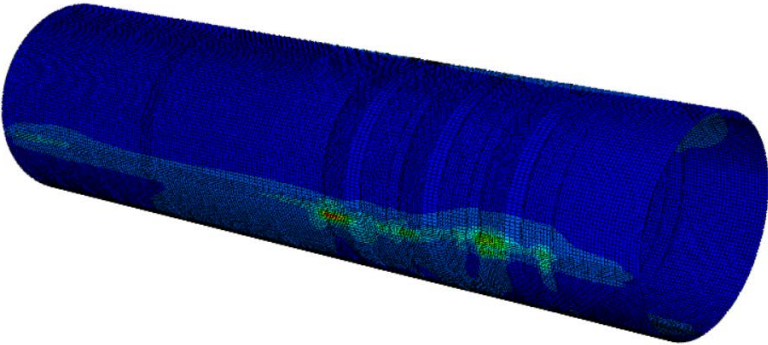
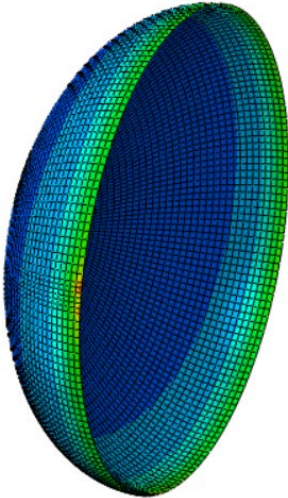
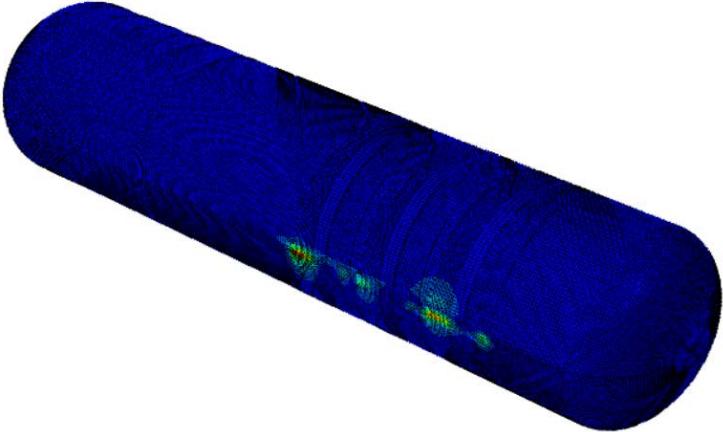


TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		Escuadras rigidificadoras inferiores	
Caso: Curva	Valor máx.real (Mpa): 188	Factor de magnificación: 20	
 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.881e+02 +1.729e+02 +1.578e+02 +1.426e+02 +1.274e+02 +1.123e+02 +9.712e+01 +8.196e+01 +6.681e+01 +5.165e+01 +3.649e+01 +2.133e+01 +6.171e+00 			
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		Llantas inferiores	
Caso: Curva	Valor máx.real (Mpa): 205	Factor de magnificación: 50	
 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +2.052e+02 +1.882e+02 +1.711e+02 +1.540e+02 +1.369e+02 +1.198e+02 +1.027e+02 +8.566e+01 +6.858e+01 +5.150e+01 +3.442e+01 +1.733e+01 +2.517e-01 			
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES		Semiesferas cisterna exterior	
Caso: Curva	Valor máx.real (Mpa): 62	Factor de magnificación: 50	
 <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +6.175e+01 +5.829e+01 +5.483e+01 +5.137e+01 +4.791e+01 +4.446e+01 +4.100e+01 +3.754e+01 +3.408e+01 +3.063e+01 +2.717e+01 +2.371e+01 +2.025e+01 			







TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Cilindro cisterna interior
Caso: Radio mínimo	Valor máx.real (Mpa):	159	Factor de magnificación: 20
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 20px;"> <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +1.593e+02 +1.489e+02 +1.385e+02 +1.282e+02 +1.178e+02 +1.074e+02 +9.706e+01 +8.670e+01 +7.633e+01 +6.596e+01 +5.560e+01 +4.523e+01 +3.486e+01 </div>  </div>			
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Semiesferas cisterna interior
Caso: Radio mínimo	Valor máx.real (Mpa):	41	Factor de magnificación: 20
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 20px;"> <p>S, Mises Envelope (max abs) (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +4.102e+01 +3.956e+01 +3.810e+01 +3.664e+01 +3.517e+01 +3.371e+01 +3.225e+01 +3.079e+01 +2.932e+01 +2.786e+01 +2.640e+01 +2.494e+01 +2.347e+01 </div>  </div>			
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Cisterna perlita
Caso: Radio mínimo	Valor uniforme (Mpa):	0,3	Factor de magnificación: 20
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 20px;"> <p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> +4.580e+00 +4.213e+00 +3.846e+00 +3.479e+00 +3.112e+00 +2.745e+00 +2.378e+00 +2.011e+00 +1.644e+00 +1.277e+00 +9.099e-01 +5.429e-01 +1.759e-01 </div>  </div>			

E.2. ITERACIONES

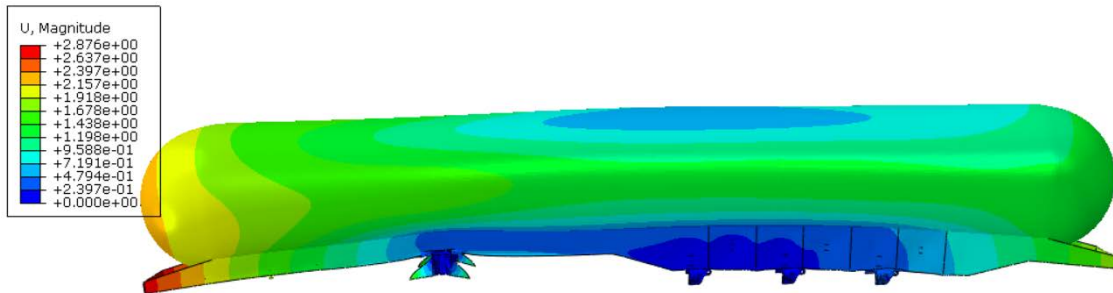
	Modelo inicial			Iteración 1			Iteración 2			Iteración 3			Modelo final							
	e(mm.)	Material	VM(Mpa)	CS	e(mm.)	Material	VM(Mpa)	CS	e(mm.)	Material	VM(Mpa)	CS	e(mm.)	Material	VM(Mpa)	CS				
Chapa deslizamiento	5	355	244	1,455	4	355	234	1,52	4	355	228	1,56	4	355	212	1,67	4	355	244	1,45
Chapa Kingpin	8	355	335	1,060	6	700	503	1,39	7	700	397	1,76	6,5	700	484	1,45	6,5	700	484	1,45
Cierre delantero y trasero	5	355	59	6,017	2	355	69	5,07	2	355	67	5,22	2	355	63	5,50	2	355	65	5,46
U delanteras	5	355	356	0,997	6	700	453	1,55	6	700	432	1,62	6	700	425	1,65	6	700	424	1,65
SopORTE estacionamiento	6	355	213	1,667	5	355	279	1,27	7	355	168	2,11	6	355	221	1,61	6	355	221	1,61
Viga estacionamiento	4	355	105,5	3,965	2	355	125	2,84	2	355	125	2,84	2	355	125	2,84	2	355	125	2,84
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	12	355	45	7,889	5	355	95	3,74	3	355	90	3,94	2	355	100	3,55	2	355	98	3,62
Nervios	8	355	343,2	1,034	10	355	240	1,48	10	355	243	1,46	10	355	243	1,46	10	355	219	1,62
U rigidificadoras suspensión	5	355	361,1	0,983	10	700	457	1,53	10	700	443	1,58	10	700	449	1,56	10	700	440	1,59
Alas viga suspensión	6,9	355	165,1	2,150	6	355	252	1,41	7	355	220	1,61	6,5	355	228	1,56	6,5	355	227	1,56
Almas viga suspensión	4,7	355	159,2	2,230	4	355	248	1,43	5	355	199	1,78	4,5	355	220	1,61	4,5	355	216	1,64
Alas travesaño	4,2	355	100,5	3,532	2	355	84	4,23	2	355	84	4,23	2	355	85	4,18	2	355	84	4,23
Almas travesaño	3,3	355	30,9	11,489	2	355	73	4,95	2	355	73	4,95	2	355	72	4,93	2	355	72	4,93
Escuadra rigidificadora superior	10	355	190,3	1,865	12	355	234	1,52	12	355	231	1,54	12	355	232	1,53	12	355	230	1,54
Escuadra rigidificadora inferior	12	355	188,1	1,887	12	355	186	1,91	10	355	190	1,87	8	355	220	1,61	7	355	232	1,53
Llanta superior	12	355	274,2	1,295	5	700	433	1,62	5	700	480	1,46	5	700	496	1,41	5,5	700	476	1,47
Llanta inferior	12	355	205	1,732	5	700	582	1,20	6	700	397	1,76	5,5	700	553	1,27	6	700	477	1,47
Almas largueros	6	355	356,4	0,996	4	700	530	1,32	5	700	363	1,93	4,5	700	437	1,60	4,5	700	432	1,62
Cilindro exterior	5	355	235	1,511	2	700	356	1,97	2	700	356	1,97	2	700	356	1,97	2	700	356	1,97
Cilindro interior	5	355	159,3	2,228	2	355	235	1,51	2	355	235	1,51	2	355	235	1,51	2	355	235	1,51
Semiesferas interiores	5	355	41	8,659	2	355	92	3,86	2	355	92	3,86	2	355	92	3,86	2	355	92	3,86
Semiesferas exteriores	5	355	61,7	5,754	2	355	114	3,11	2	355	114	3,11	2	355	114	3,11	2	355	114	3,11
Cisterna perfito(volumétrica)	50	0,4	0,3	1,333	50	0,4	0,3	1,33	50	0,4	0,3	1,33	50	0,4	0,3	1,33	50	0,4	0,3	1,33

Valores modificados en la iteración

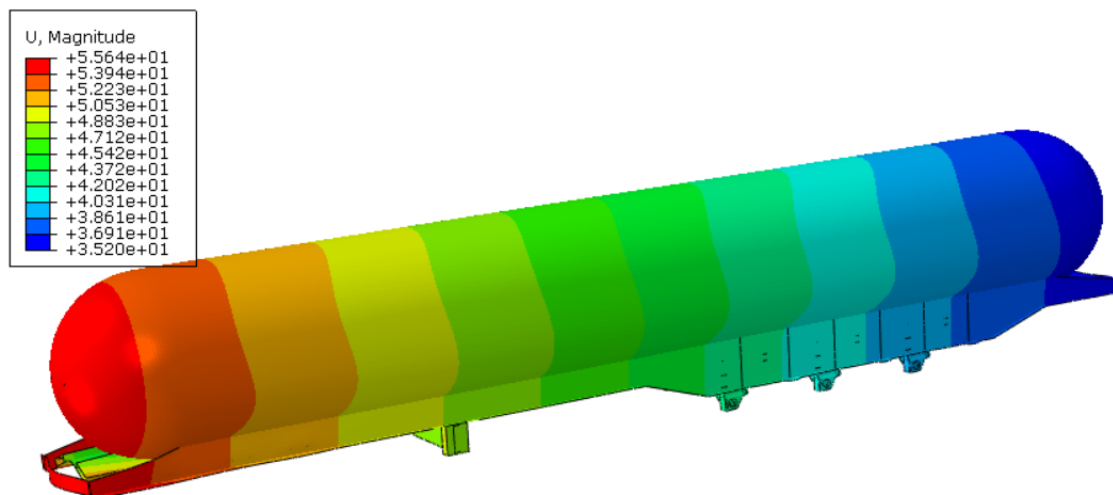
E.3 RESULTADOS MODELO FINAL

E.3.1 DEFORMADA

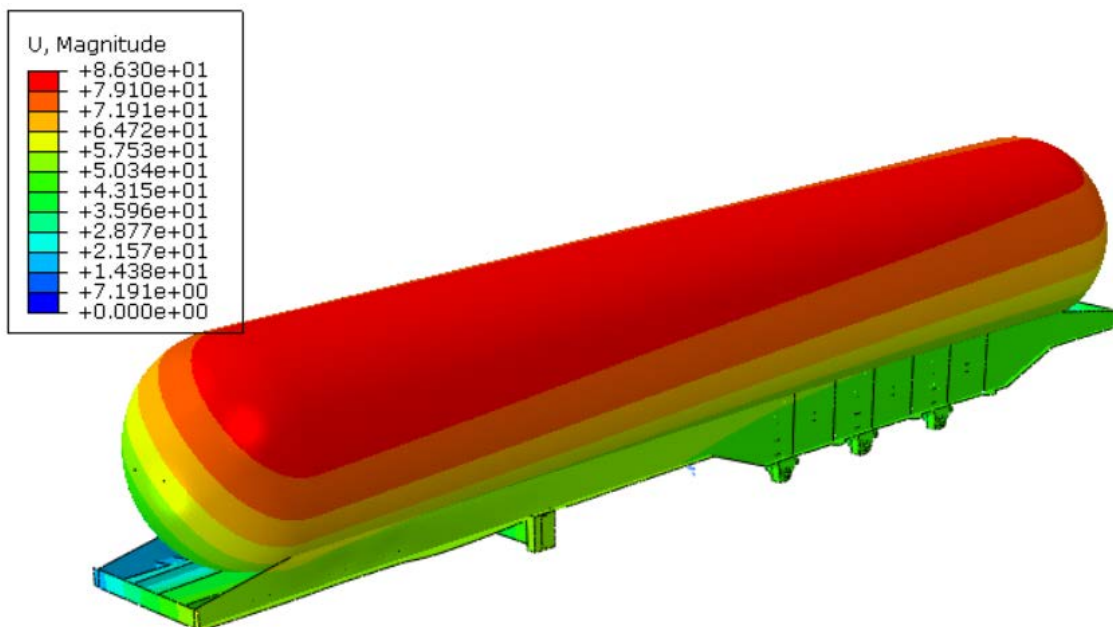
➤ Deformada apoyo en patas



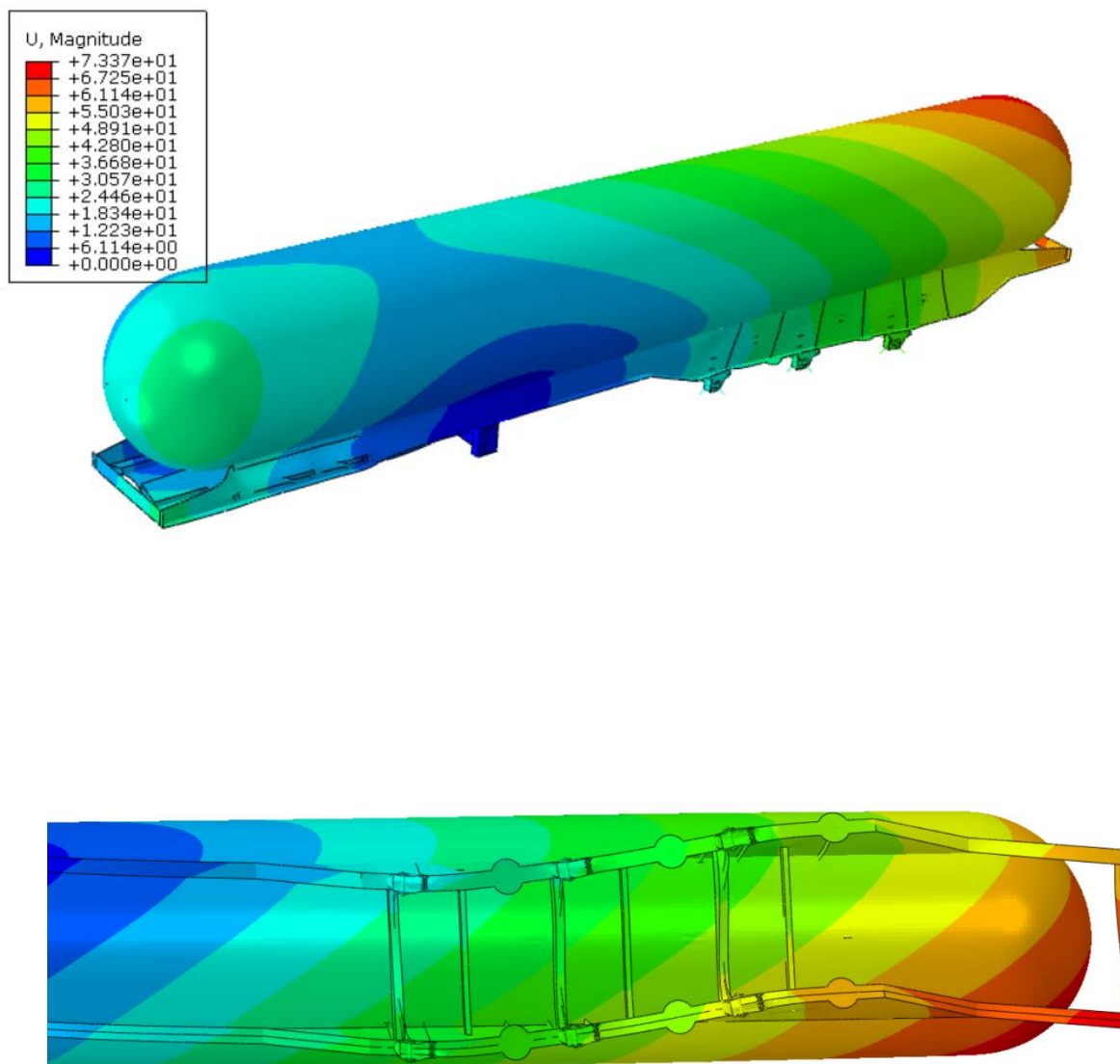
➤ Deformada frenada



➤ Deformada curva



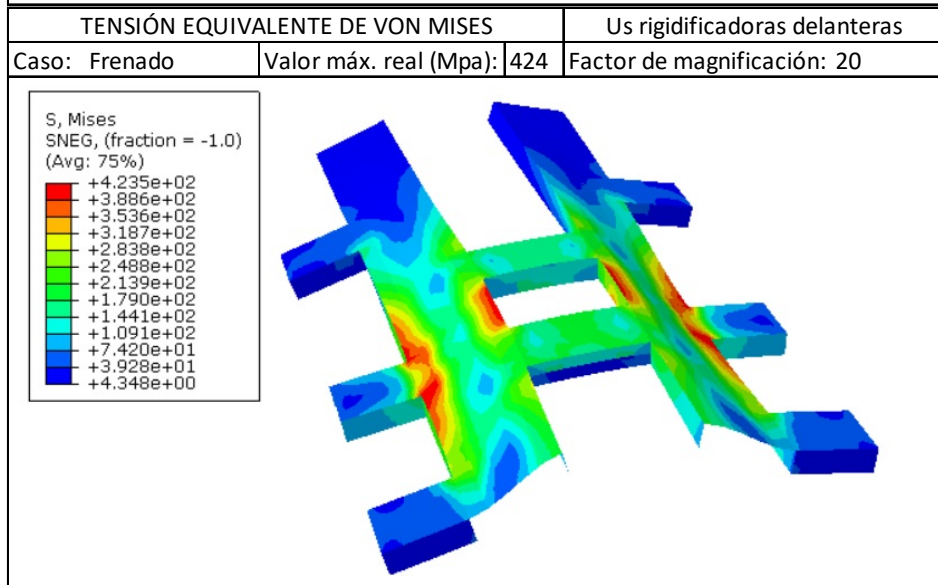
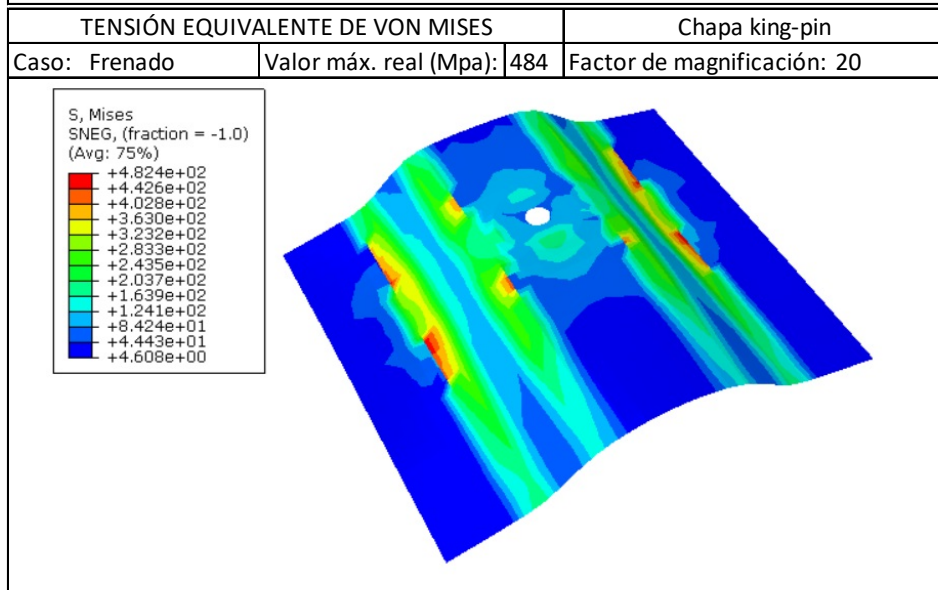
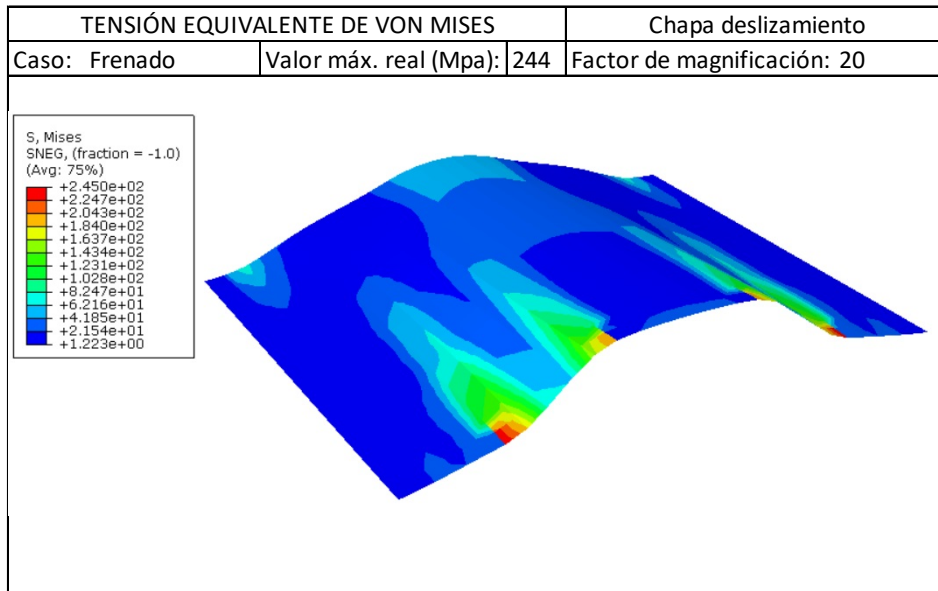
➤ Deformada radio mínimo

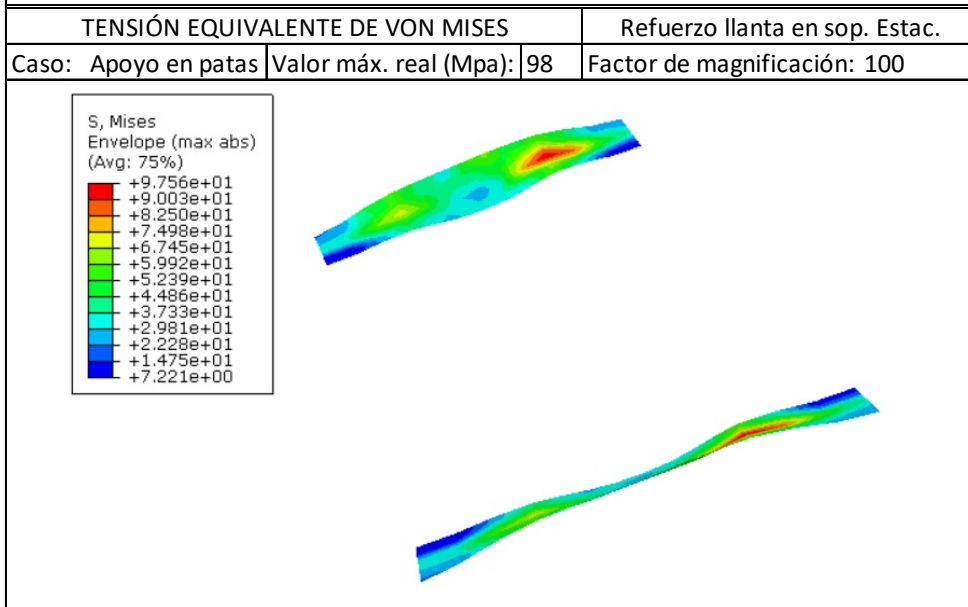
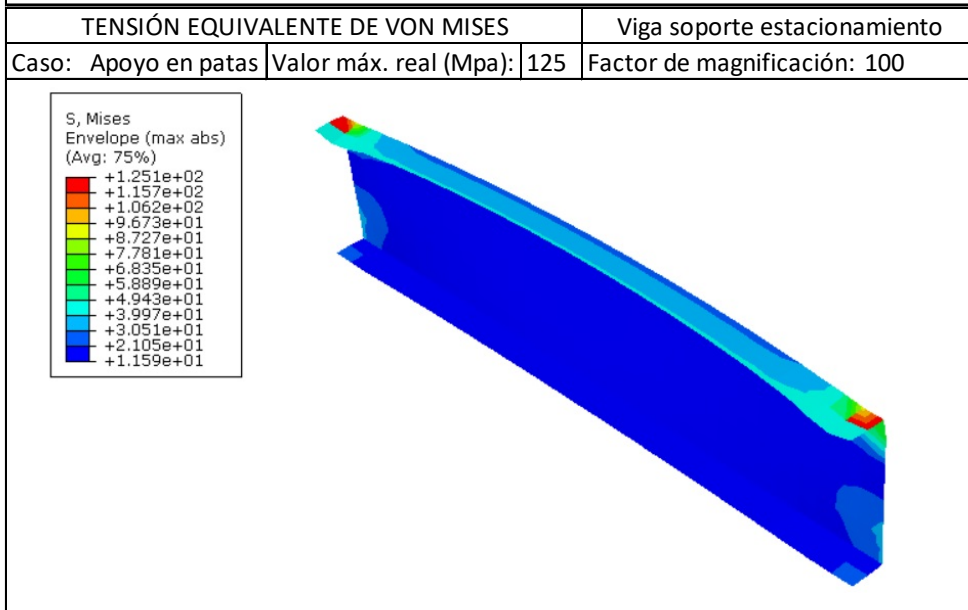
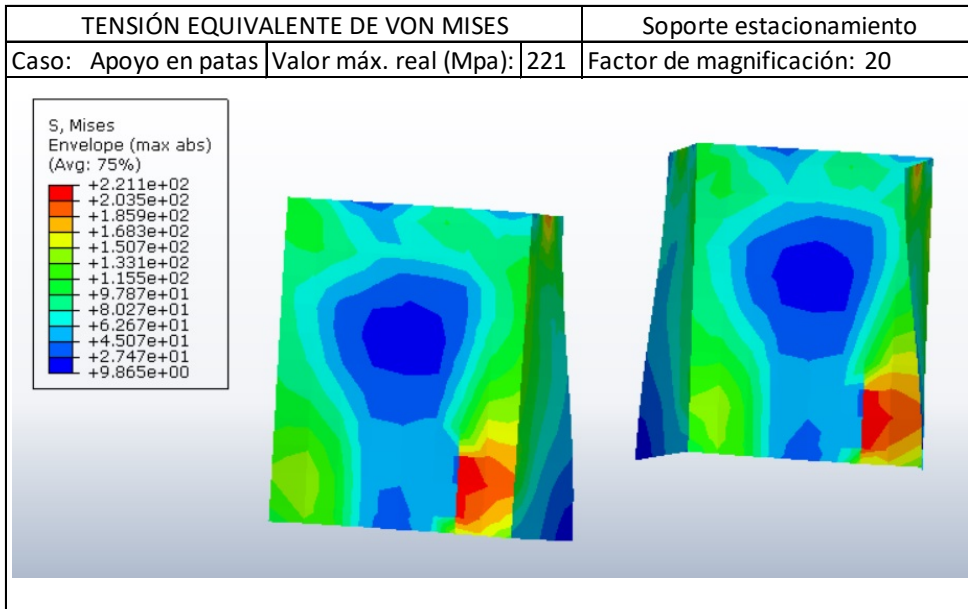


E.3.2 TABLA RESUMEN

Caso:	Material	e(mm.)	PESO (KG.)	MÁXIMO		ESTÁTICO		APOYO PATAS		FRENADO		CURVA		RADIO MÍNIMO	
				VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS	VM(Mpa)	CS		
RESULTADO CALCULOS MODELO OPTIMIZADO															
Chapa deslizamiento	355	4	46,2	244	1,45	195	1,82	2	177,50	244	1,45	164	2,16	167	2,13
Chapa Kingpin	700	6,5	79,5	484	1,45	384	1,82	8	87,50	484	1,45	377	1,86	384	1,82
Cierre delantero y trasero	355	2	7	65	5,46	53	6,70	1	355,00	65	5,46	49	7,24	51	6,96
U delanteras	700	6	118,6	424	1,65	333	2,10	9	77,78	424	1,65	419	1,67	421	1,66
SopORTE estacionamiento	355	6	14,5	221	1,61	9	39,44	221	1,61	13	27,31	54	6,57	61	5,82
Viga estacionamiento	355	2	9,7	125	2,84	2,5	142,00	125	2,84	3	118,33	81	4,38	94	3,78
Refuerzo de llanta en soporte estacionamiento	355	2	2	98	3,62	20	17,75	98	3,62	27	13,15	69	5,14	78	4,55
Nervios	355	10	24,7	219	1,62	28	12,68	13	27,31	35	10,14	34	10,44	219	1,62
U rigidificadoras suspensión	700	10	65,9	440	1,59	47	14,89	66	10,61	91	7,69	157	4,46	440	1,59
Alas viga suspensión	355	6,5	28	227	1,56	8	44,38	10	35,50	10	35,50	84	4,23	227	1,56
Almas viga suspensión	355	4,5	19,1	216	1,64	8	44,38	10	35,50	13	27,31	74	4,80	216	1,64
Alas travesaño	355	2	5,6	84	4,23	4	88,75	4	88,75	4	88,75	20	17,75	84	4,23
Almas travesaño	355	2	4,7	72	4,93	1,6	221,88	2	177,50	2	177,50	72	4,93	32	11,09
Escuadra rigidificadora superior	355	12	8,7	230	1,54	9	39,44	10	35,50	12	29,58	80	4,44	230	1,54
Escuadra rigidificadora inferior	355	7	8,2	232	1,53	50	7,10	75	4,73	88	4,03	20	17,75	232	1,53
Llanta superior	700	5,5	118,6	476	1,47	52	13,46	58	12,07	50	14,00	141	4,96	476	1,47
Llanta inferior	700	6	152,6	477	1,47	73	9,59	89	7,87	164	4,27	254	2,76	477	1,47
Almas largueros	700	4,5	387,2	432	1,62	65	10,77	137	5,11	87	8,05	389	1,80	432	1,62
Cilindro exterior	700	2	1117,8	356	1,97	110	6,36	111	6,31	112	6,25	188	3,72	356	1,97
Cilindro interior	355	2	1061,4	235	1,51	135	2,63	143	2,48	140	2,54	185	1,92	235	1,51
Semiesferas interiores	355	2	173,1	92	3,86	85	4,18	81	4,38	90	3,94	89	3,99	92	3,86
Semiesferas exteriores	355	2	192	114	3,11	90	3,94	98	3,62	88	4,03	114	3,11	95	3,74
Cisterna perlitita (volumétrica)	0,4	50	521,8	0,3	1,33	0,3	1,33	0,3	1,33	0,3	1,33	0,3	1,33	0,3	1,33

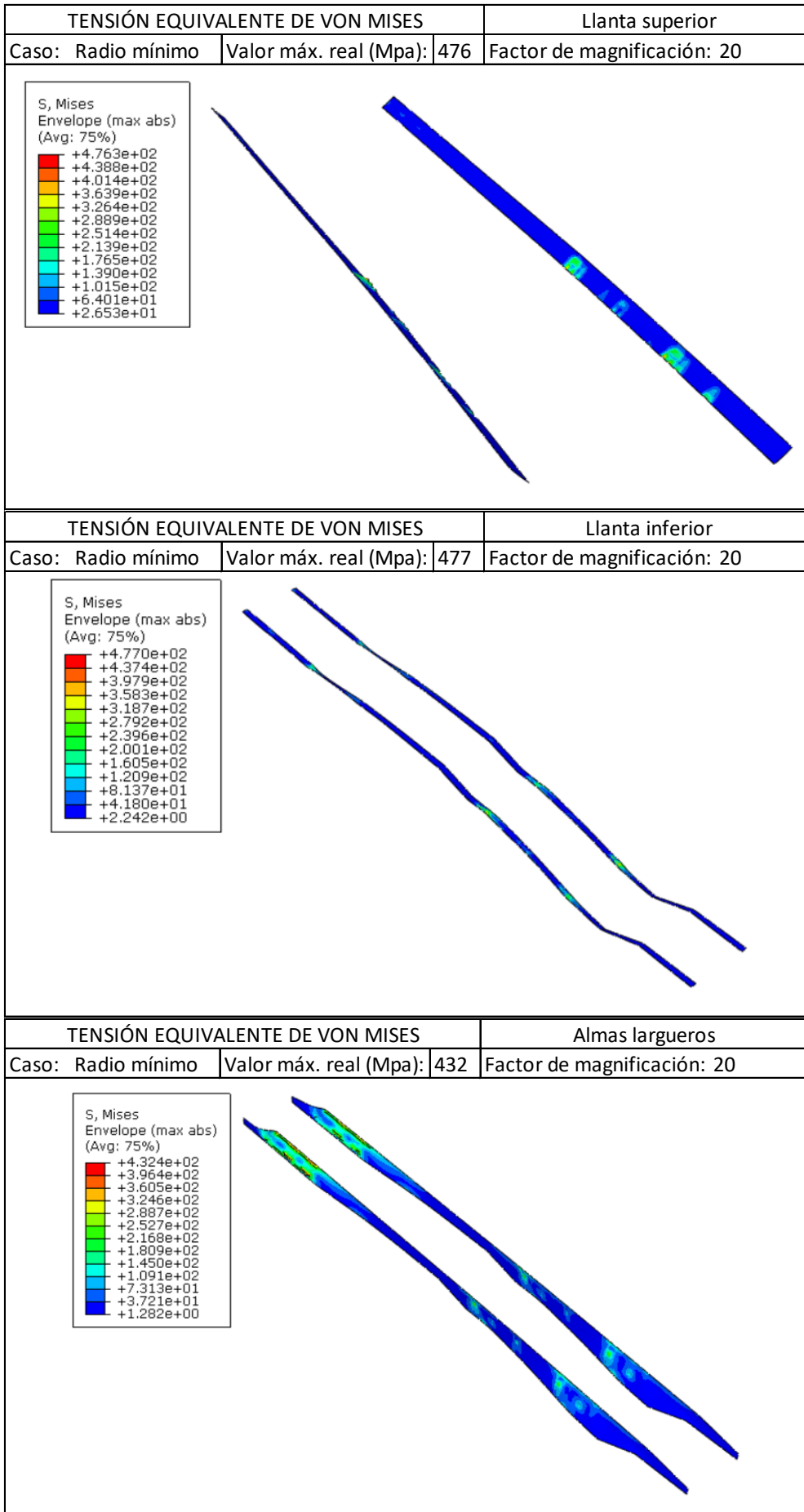
E.3.3. TENSIONES EQUIVALENTES DE VON MISES POR COMPONENTE

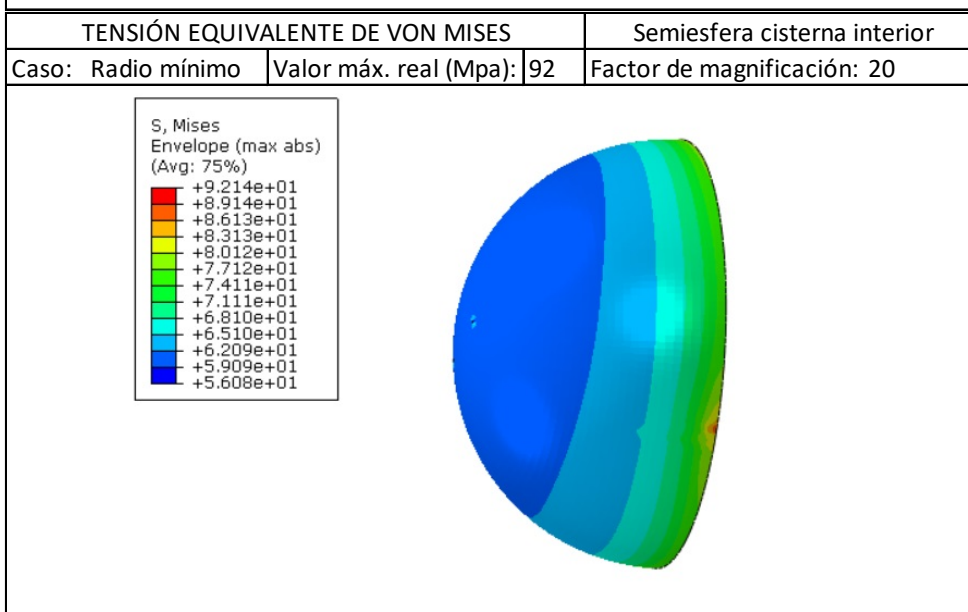
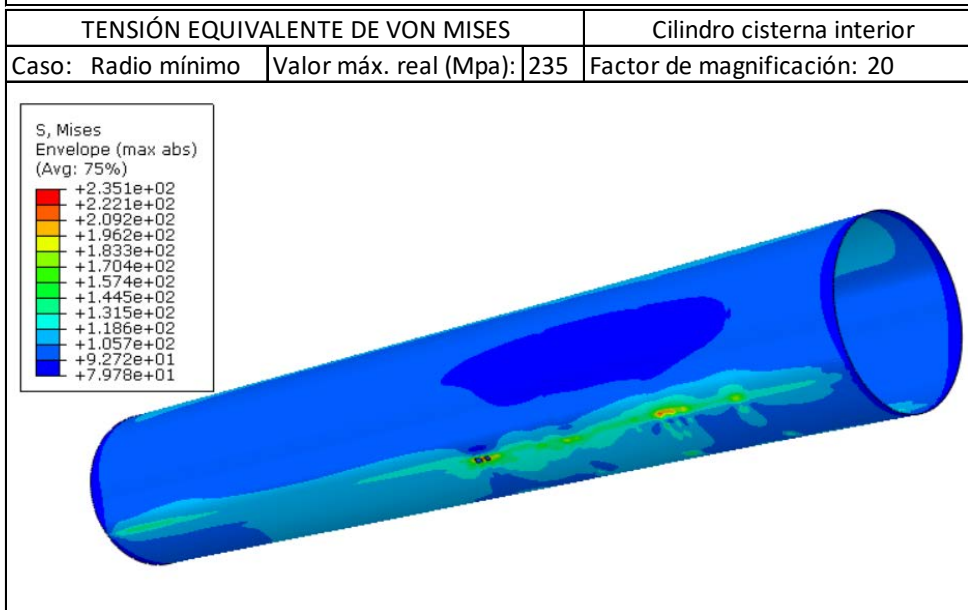
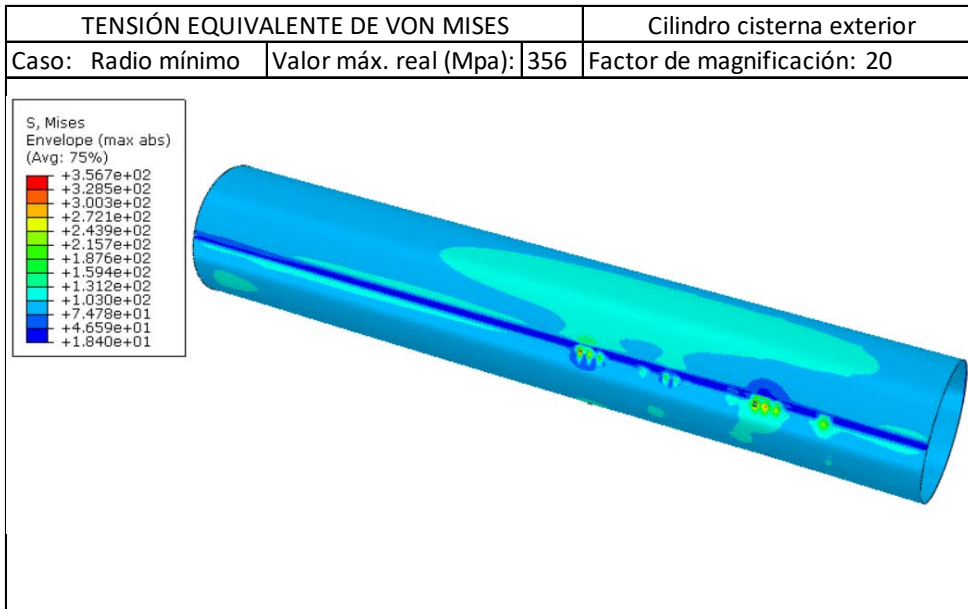


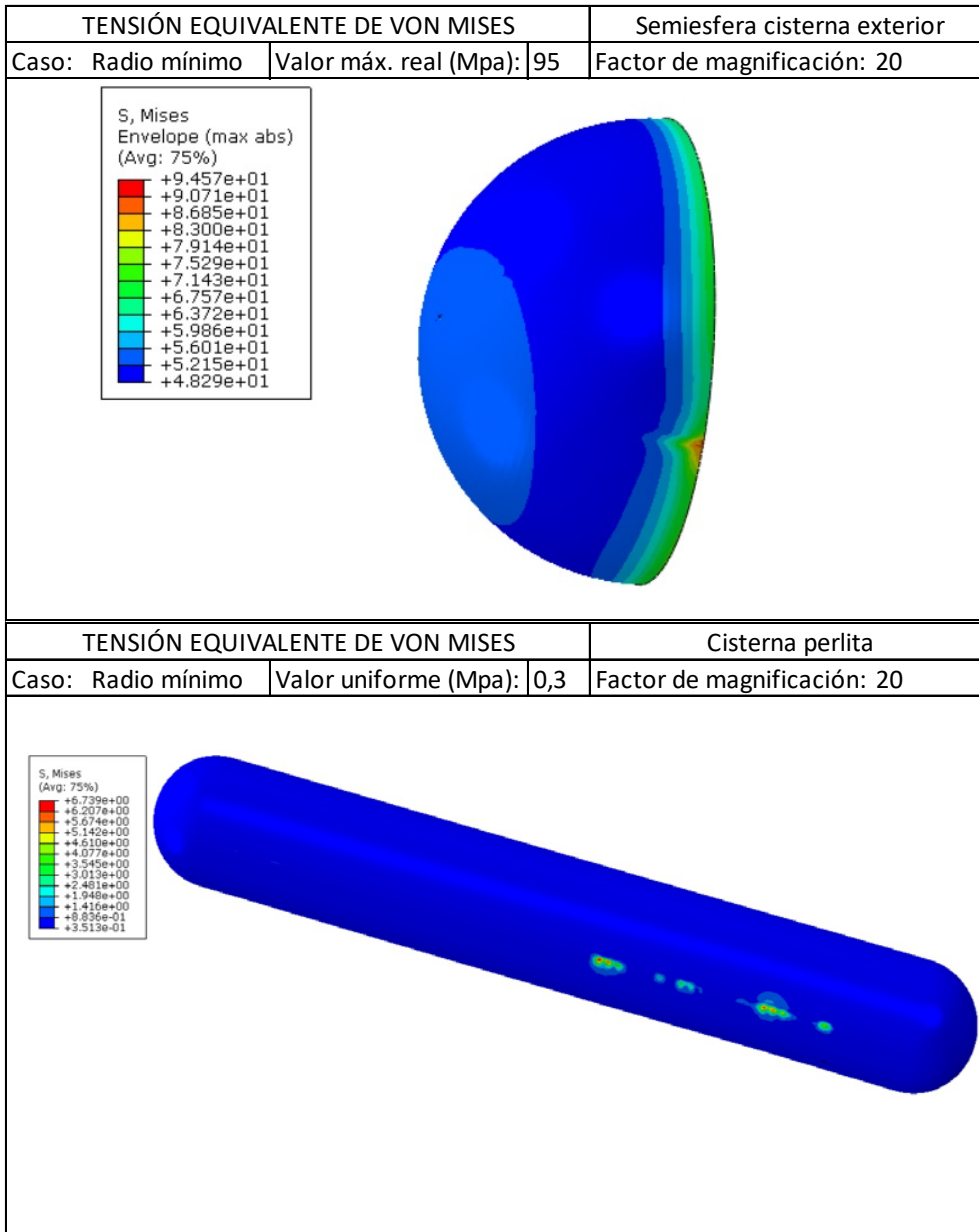


TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Nervios refuerzo alma
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa):	219	Factor de magnificación: 20
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Us rigidificadoras suspensión
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa):	440	Factor de magnificación: 20
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Vigas suspensión
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa):	227	Factor de magnificación: 20

TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Travesaños
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa): 84		Factor de magnificación: 20
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Escuadras rigidificadoras superiores
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa): 230		Factor de magnificación: 20
TENSIÓN EQUIVALENTE DE VON MISES			Escuadras rigidificadoras inferiores
Caso: Radio mínimo	Valor máx. real (Mpa): 232		Factor de magnificación: 20

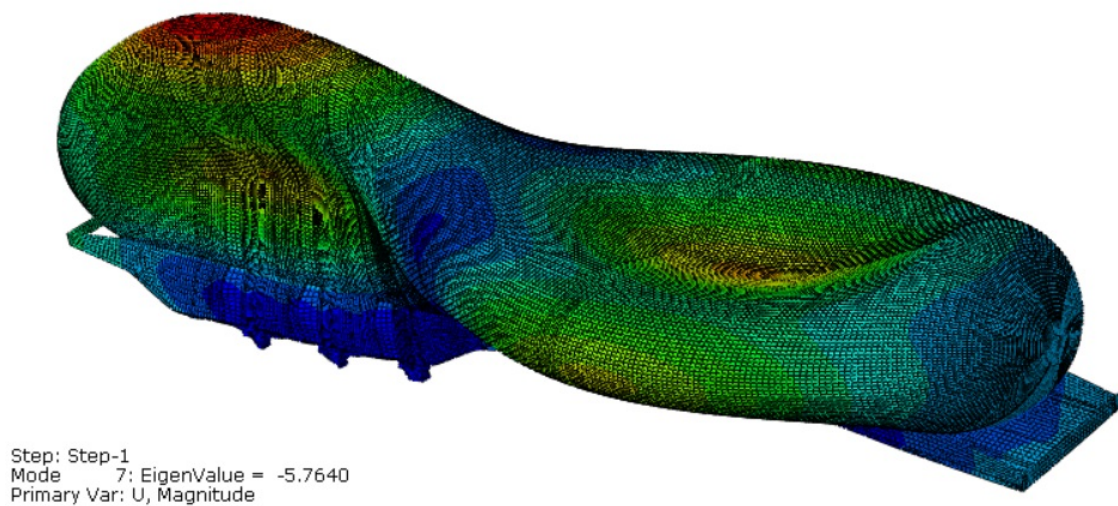
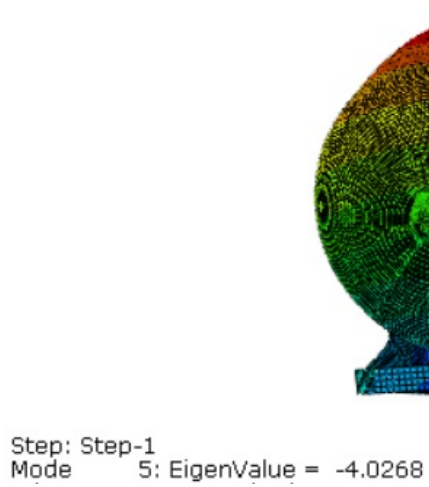
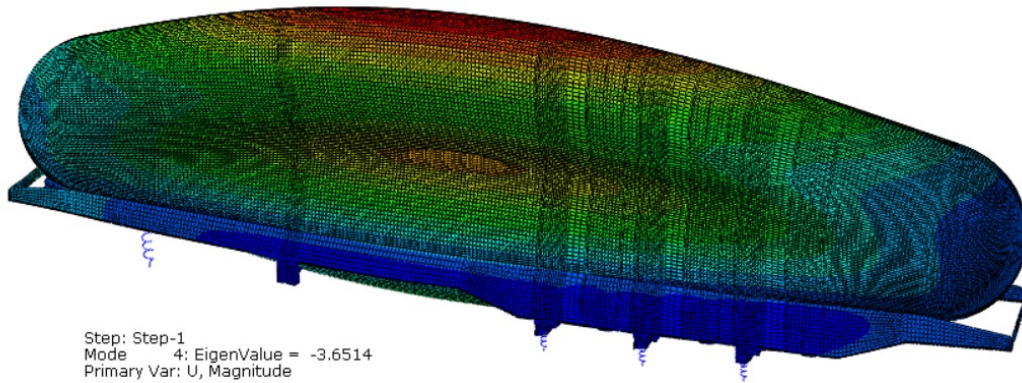


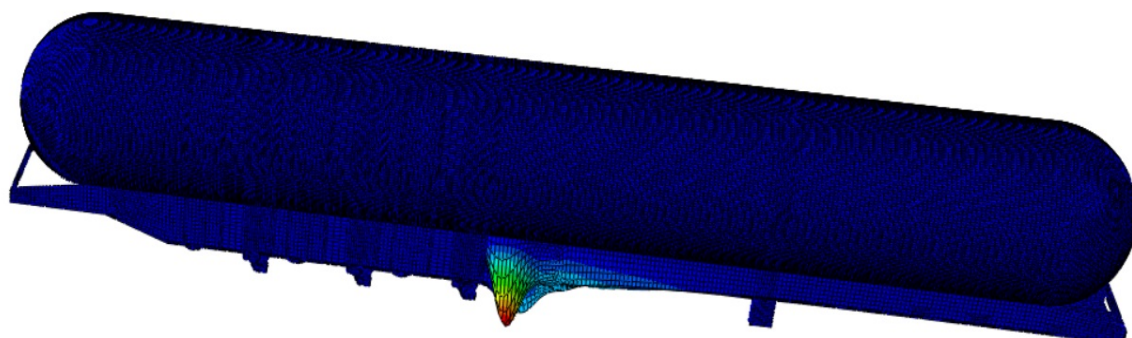




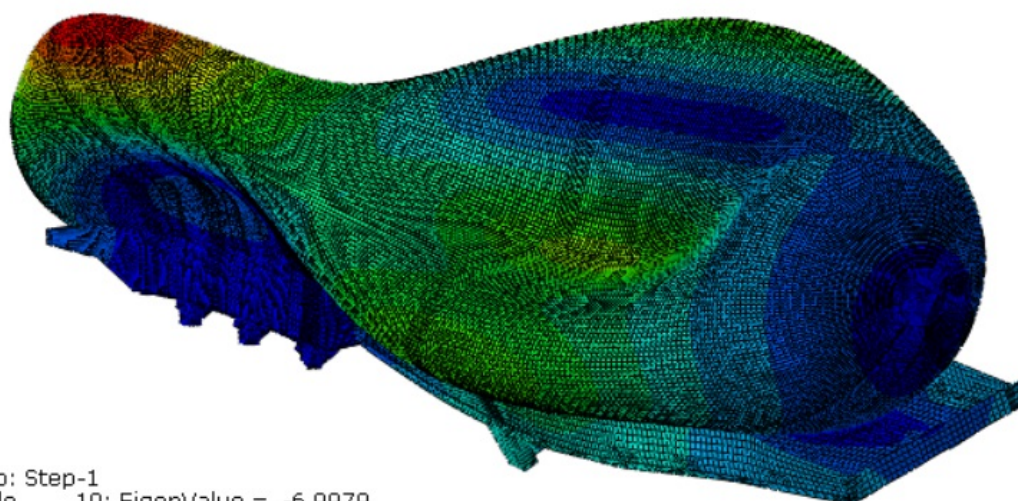
E.3.4 MODOS DE PANDEO

➤ Caso estático



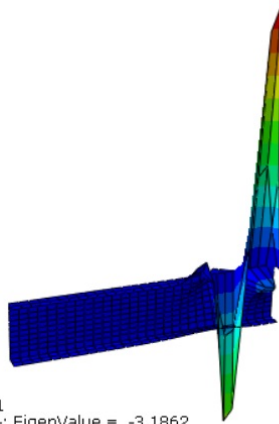


Step: Step-1
Mode 8: EigenValue = 6.5664
Primary Var: U, Magnitude

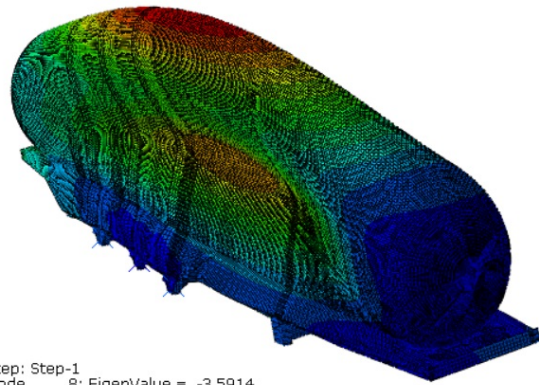


Step: Step-1
Mode 10: EigenValue = -6.9979
Primary Var: U, Magnitude

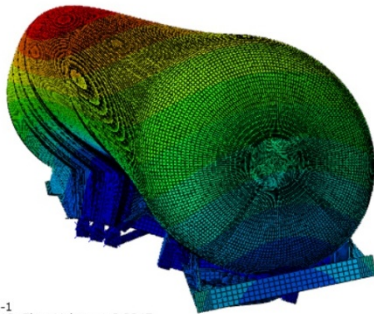
➤ Caso de radio mínimo



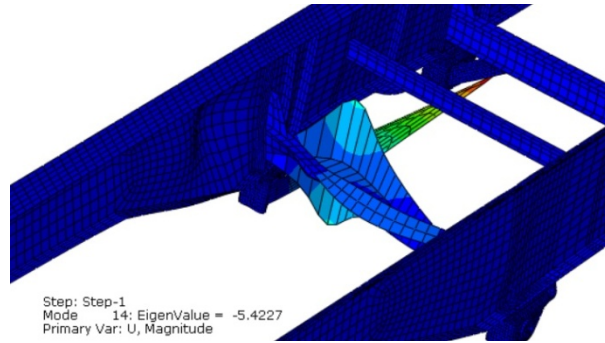
Step: Step-1
Mode 4: EigenValue = -3.1862
Primary Var: U, Magnitude



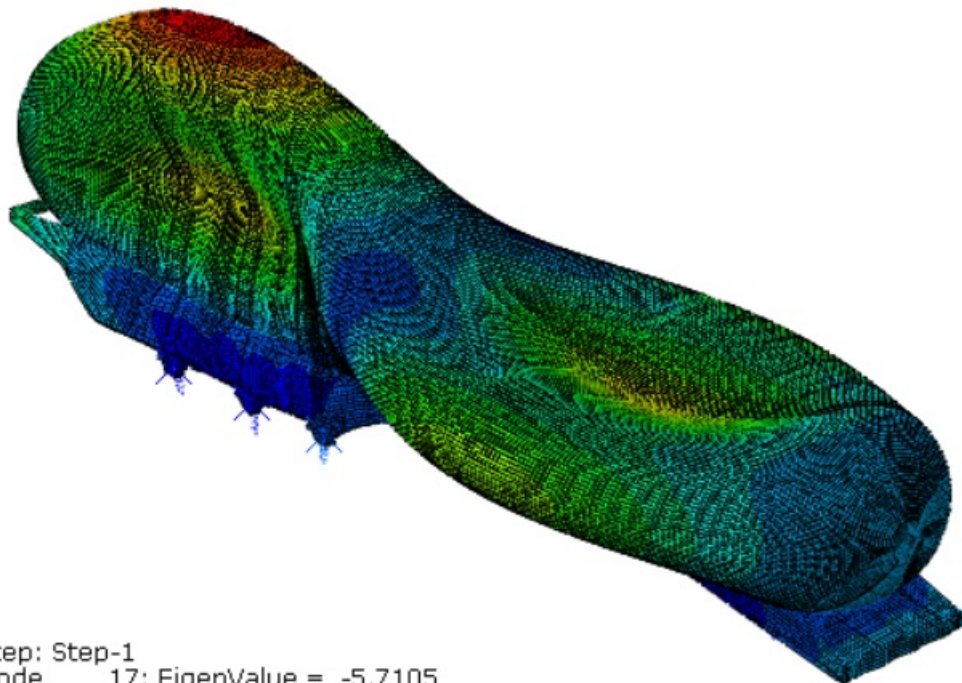
Step: Step-1
Mode 8: EigenValue = -3.5914
Primary Var: U, Magnitude



Step: Step-1
Mode 10: EigenValue = -3.8347
Primary Var: U, Magnitude



Step: Step-1
Mode 14: EigenValue = -5.4227
Primary Var: U, Magnitude



Step: Step-1
Mode 17: EigenValue = -5.7105
Primary Var: U, Magnitude