

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires

“Verificación por método de elementos finitos de semirremolque para transporte de ácido clorhídrico”

Título: Ingeniero en Mecánica

Carrera: Ingeniería Mecánica

Práctica Profesional Supervisada

Estudiante: Tellería, Guido

Tutor Docente: Arrien, Patricio G.

Tutor de Empresa/Institución/Organización: Amici, Javier

Fecha de Presentación: .../.../...

Resumen Ejecutivo

Como paso final antes de la obtención del título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA) sede Junín, se llevó a cabo la práctica profesional supervisada (PPS) en la empresa Tanques FANGIO S.A localizada en RP 32 Km 2, Pergamino, Buenos Aires. Dicha empresa, destacada en la manufactura, reparación y modificación de unidades semirremolques y equipos distribuidores destinados al transporte de sustancias peligrosas por carretera se encuentra en la necesidad de obtener la Licencia de Configuración de Modelo (LCM) de un semirremolque para el transporte de ácido clorhídrico. Dentro de los requisitos establecidos por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) quien otorga la LCM, es esencial presentar un informe donde se verifique y valide el diseño del semirremolque haciendo uso del método de elementos finitos (MEF).

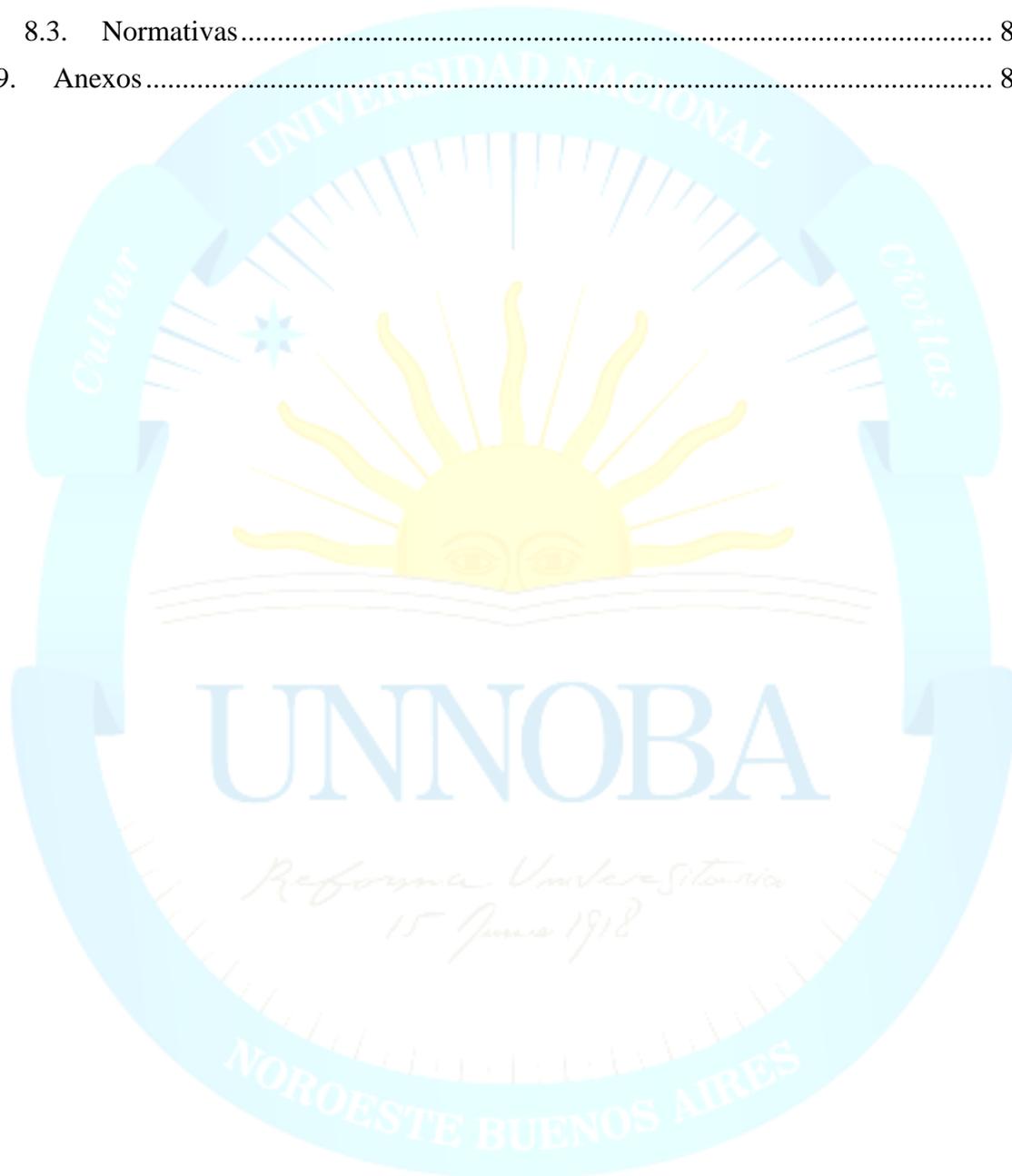
A lo largo de la lectura del informe se desarrolla el preprocesamiento del modelo digital del tanque cisterna. Dentro de estas tareas se enmarcan la determinación de las fuerzas reactivas del modelo, el acondicionamiento del gemelo digital del semirremolque, la definición de las propiedades físicas/mecánicas del material empleado para su manufactura, la definición de la vinculación del tanque cisterna con el entorno, la definición del mallado del modelo a analizar y, por último, la determinación y modelado de las cargas actuantes establecidas por el código BPVC Section XII - Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks.

Finalmente, se presentan y evalúan los resultados de la simulación, comprendiendo y analizando el campo de tensiones y desplazamientos producidos por cada uno de los escenarios de cargas planteados, como también el trazado del factor de seguridad.

Índice general

1.	Introducción.....	8
2.	Objetivos.....	9
2.1.	Objetivo general.....	9
2.2.	Objetivos específicos	9
3.	Plan de trabajo y carga horaria	10
4.	Justificativo de la PPS	10
4.1.	La empresa.....	10
4.2.	LCM – Licencia de Configuración de Modelo.....	11
4.2.1.	Pasos para la obtención de la LCM	11
5.	Desarrollo de la temática	12
5.1.	Ácido Clorhídrico 2+1	12
5.2.	Cálculo de fuerzas reactivas.....	13
5.3.	Modelado de la cisterna	17
5.3.1.	Gemelo digital	17
5.3.2.	Acondicionamiento de modelo.....	18
5.4.	Verificación analítica de componentes	20
5.4.1.	Envolverte cilíndrica.....	20
5.4.2.	Cabezales toriesféricos	23
5.5.	Definición de las codiciones de contorno o inputs	26
5.5.1.	Material.....	26
5.5.2.	Sujeciones/Vinculaciones.....	29
5.5.3.	Mallado del modelo.....	31
5.5.4.	Cargas	33
5.6.	Resultados.....	36
5.6.1.	Condición estática A.....	36
5.6.2.	Condición dinámica B	40
5.6.4.	Condición dinámica C	53
5.6.5.	Condición dinámica D.....	56
5.6.6.	Condición dinámica E	62
5.6.7.	Condición estática F	67
5.6.8.	Condición estática G.....	70
5.6.9.	Condición estática H.....	73
5.6.10.	Condición estática I	76

6.	Conclusión.....	80
7.	Agradecimientos.....	81
8.	Referencias bibliográficas	82
8.1.	Bibliografía	82
8.2.	Links de interés.....	82
8.3.	Normativas.....	82
9.	Anexos.....	82



Índice de imágenes

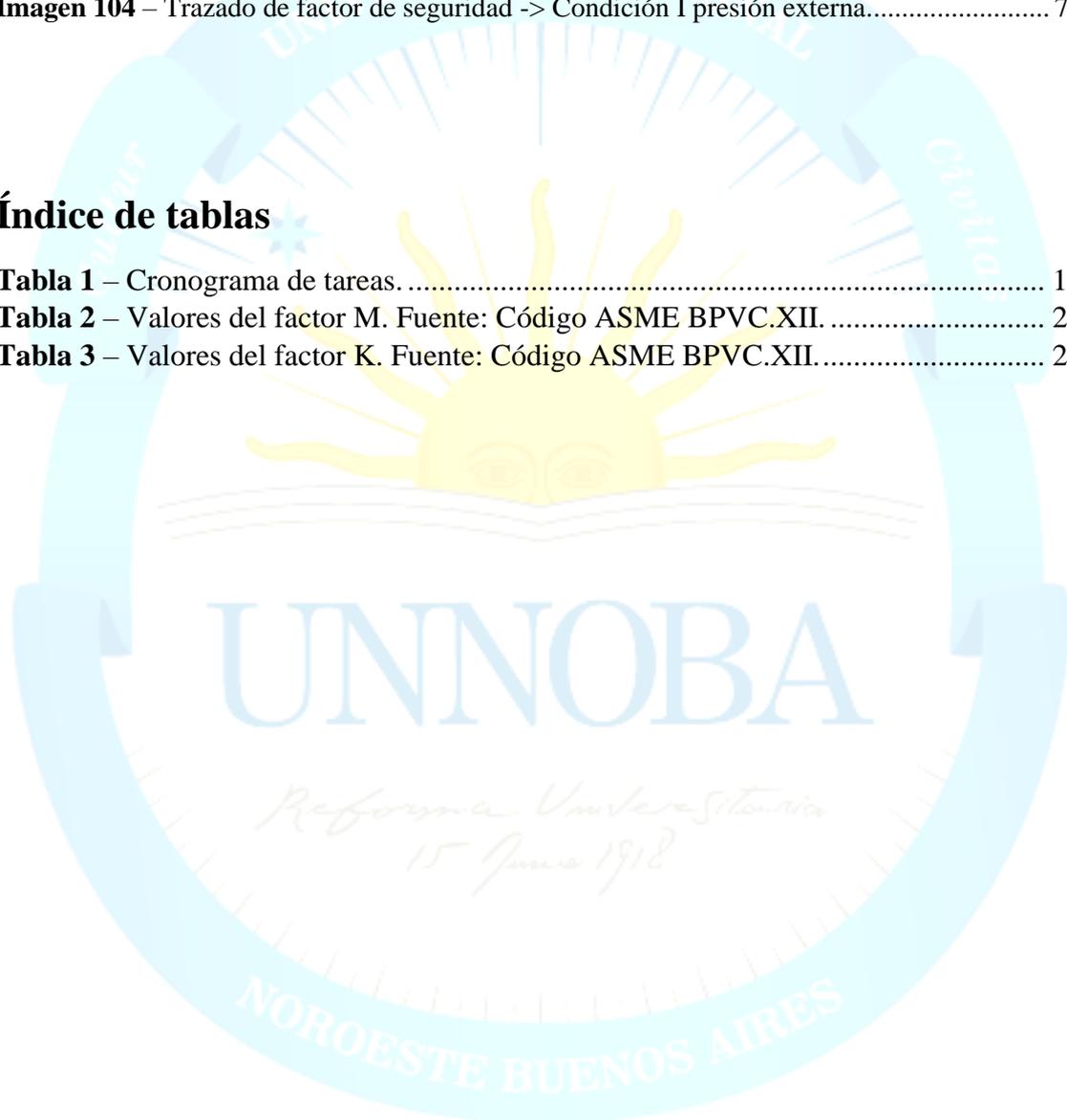
Imagen 1	– Tanques FANGIO.	11
Imagen 2	– Ácido Clorhídrico 2+1.....	12
Imagen 3	– Placa de datos técnicos de la cisterna.	12
Imagen 4	– Centro de gravedad del semirremolque.....	13
Imagen 5	– Modelo hiperestático viga madre.	14
Imagen 6	– Centro geométrico para el sistema de rodado.....	14
Imagen 7	– Simplificación de modelo a isostático -> Viga madre.....	15
Imagen 8	– Sistema hiperestático para modelado de ejes.	16
Imagen 9	- Modelo 3D de la cisterna.	17
Imagen 10	– Modelo 3D optimizado.....	18
Imagen 11	- Vista explosionada del semirremolque.	18
Imagen 12	– Vista en corte de la cisterna.....	19
Imagen 13	– Dimensiones del cabezal toriesférico.	19
Imagen 14	– Optimización de piezas particulares. (Escuadra Travesaño).....	20
Imagen 15	– Distancia máxima entre anillos rigidizadores.....	22
Imagen 16	– Dimensiones característica -> Cabezal toriesférico.....	23
Imagen 17	– Propiedades del acero F-26.	26
Imagen 18	– Equivalencia acero F-26 y acero ASTM A36.	27
Imagen 19	– Rango máximo de propiedades de resistencia ultima. Fuente: ASME BPVC.XII.28	
Imagen 20	- Rango máximo de propiedades de resistencia a la fluencia. Fuente: ASME BPCV.XII.....	28
Imagen 21	– Modelado quinta rueda.....	29
Imagen 22	– Curva de deflexión de la suspensión mecánica.	30
Imagen 23	– Vinculación elástica.	31
Imagen 24	– Parámetros de mallado.	32
Imagen 25	– Modelo mallado.....	32
Imagen 26	– Trazado del cociente de aspecto del mallado.	33
Imagen 27	– Cargas -> Condición estática A -> Vista en corte.	37
Imagen 28	– Campo de tensiones -> Condición estática A.....	37
Imagen 29	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática A.....	38
Imagen 30	– Concentrador de tensiones -> Condición estática A.....	38
Imagen 31	– Campo de desplazamientos -> Condición estática A.	39
Imagen 32	– Trazado del factor de seguridad -> Condición estática A.	39
Imagen 33	– Cargas -> Condición dinámica B _{1a} -> Vista en corte.	40
Imagen 34	– Campo de tensiones -> Condición dinámica B _{1a}	41
Imagen 35	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B _{1a}	41
Imagen 36	– Concentración de tensiones -> Condición dinámica B _{1a}	42
Imagen 37	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B _{1a} -> Vista frontal.....	42
Imagen 38	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B _{1a} -> Vista lateral.....	43
Imagen 39	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B _{1a} -> Vista inferior.	43
Imagen 40	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B _{1a}	44
Imagen 41	– Cargas -> Condición dinámica B _{1b} -> Vista en corte.	44
Imagen 42	– Campo de tensiones -> Condición dinámica B _{1b}	45
Imagen 43	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B _{1b}	45
Imagen 44	– Concentración de tensiones -> Condición dinámica B _{1b}	46
Imagen 45	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B _{1b} -> Vista frontal.....	46
Imagen 46	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B _{1b} -> Vista lateral.	47

Imagen 47	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B1b.....	47
Imagen 48	– Carga -> Condición dinámica B ₂ -> Vista en corte.	48
Imagen 49	– Campo de tensiones -> Condición dinámica B ₂	49
Imagen 50	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B ₂	49
Imagen 51	– Concentración de tensiones -> Condición dinámica B ₂	50
Imagen 52	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B ₂ -> Vista frontal.	50
Imagen 53	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B ₂ -> Vista inferior.....	51
Imagen 54	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B ₂ -> Vista inferior.....	51
Imagen 55	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B ₂	52
Imagen 56	– Campo de tensiones -> Condición dinámica C.	53
Imagen 57	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica C.	53
Imagen 58	– Concentrador de tensiones -> Condición dinámica C.	54
Imagen 59	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica C.....	54
Imagen 60	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica C.....	55
Imagen 61	– Cargas -> Condición dinámica D -> Vista en corte.	56
Imagen 62	– Campo de tensiones -> Condición dinámica D.	56
Imagen 63	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114 MPa -> Condición dinámica D.....	57
Imagen 64	– Concentración de tensiones -> Condición dinámica D.	57
Imagen 65	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica D.....	58
Imagen 66	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica D.....	58
Imagen 67	– Cargas -> Condición dinámica D frenado -> Vista en corte.	59
Imagen 68	– Campo de tensiones -> Condición dinámica D frenado.....	59
Imagen 69	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica D frenado.	60
Imagen 70	– Concentración de tensiones -> condición dinámica D frenado.	60
Imagen 71	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica D frenado.	61
Imagen 72	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica D frenado.....	61
Imagen 73	– Cargas -> Condición dinámica E -> Vista en corte.	62
Imagen 74	– Campo de tensiones -> Condición dinámica E.....	63
Imagen 75	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica E.	63
Imagen 76	– Campo de tensiones -> ISO superficie 250MPa -> Condición dinámica E.	64
Imagen 77	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista frontal.	64
Imagen 78	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista inferior.	65
Imagen 79	– Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista lateral.	65
Imagen 80	– Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica E.	66
Imagen 81	– Cargas -> Condición estática F.	67
Imagen 82	– Campo de tensiones -> Condición estática F.	67
Imagen 83	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática F.	68
Imagen 84	– Campo de desplazamientos-> Condición estática F.....	68
Imagen 85	– Trazado del factor de seguridad -> Condición estática F.....	69
Imagen 86	– Cargas -> Condición estática G -> Vista en corte.	70
Imagen 87	– Campo de tensiones -> Condición estática G.....	70
Imagen 88	– Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática G.....	71
Imagen 89	– Campo de tensiones -> ISO superficie en 250MPa -> Condición estática G.....	71
Imagen 90	– Concentración de tensiones -> Condición estática G.	72
Imagen 91	– Campo de desplazamientos -> Condición estática G.	72
Imagen 92	– Trazado del factor de seguridad -> Condición estática G.	73
Imagen 93	– Sobrepresión interna -> Condición H.....	73
Imagen 94	– Campo de tensiones -> Condición H sobrepresión interna.	74

Imagen 95 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición H sobrepresión interna.....	74
Imagen 96 – Concentración de tensiones -> Condición H sobrepresión interna.....	75
Imagen 97 – Campo de desplazamientos -> Condición H sobrepresión interna.....	75
Imagen 98 – Trazado del factor de seguridad -> Condición H sobrepresión interna.....	76
Imagen 99 – Presión externa -> Condición I.....	76
Imagen 100 – Campo de tensiones -> Condición I presión externa.....	77
Imagen 101 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición I presión externa.....	77
Imagen 102 – Concentración de tensiones -> Condición I presión externa.....	78
Imagen 103 – Campo de desplazamientos -> Condición I presión externa.....	78
Imagen 104 – Trazado de factor de seguridad -> Condición I presión externa.....	79

Índice de tablas

Tabla 1 – Cronograma de tareas.....	10
Tabla 2 – Valores del factor M. Fuente: Código ASME BPVC.XII.....	24
Tabla 3 – Valores del factor K. Fuente: Código ASME BPVC.XII.....	24



1. Introducción

En contexto de las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS) de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires (UNNOBA), se llevaron a cabo actividades propias de la especialidad en Tanques Fangio S.A., localizada en la RP 32 Km 2, Pergamino, Buenos Aires. Esta empresa se especializa en la manufactura, reparación y modificación de unidades semirremolques y equipos distribuidores destinados al transporte de sustancias peligrosas por carretera, centrándose especialmente en la producción de semirremolques cisternas para transportar hidrocarburos (tanto livianos como pesados) y otras sustancias, como el ácido clorhídrico.

La obtención de una Licencia de Configuración de Modelo (LCM) es un paso indispensable antes de lanzar al mercado nuevos modelos de unidades. La función principal de esta licencia es garantizar el cumplimiento de los rigurosos requisitos de seguridad tanto activa como pasiva de la unidad. En este sentido, entre los diversos requisitos, uno de los más destacados es la realización de un análisis exhaustivo de esfuerzos y deformaciones.

En el marco de este proyecto, se empleó el Método de Elementos Finitos (MEF) para llevar a cabo un análisis detallado de esfuerzos y deformaciones en una unidad semirremolque diseñada para el transporte de ácido clorhídrico. El código utilizado para este análisis fue el BPVC Section XII - Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks, el cual establece las condiciones esenciales para la simulación, así como los niveles permisibles de esfuerzos y deformaciones.

Este trabajo tiene como propósito fundamental presentar y analizar críticamente los resultados obtenidos a través de la aplicación del MEF, proporcionando una evaluación de la integridad estructural de la unidad semirremolque en estudio. En última instancia, el trabajo contribuye al proceso de obtención de la Licencia de Configuración de Modelo, asegurando la conformidad con los más altos estándares de seguridad y calidad exigidos por la industria.

2. Objetivos

2.1. *Objetivo general*

Evaluar la integridad estructural de la unidad semirremolque destinada al transporte de ácido clorhídrico, mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos (MEF) conforme al código BPVC Section XII. El propósito fundamental es obtener un diagnóstico detallado de los esfuerzos y deformaciones a los que se somete la unidad, con el fin de contribuir a la obtención de la Licencia de Configuración de Modelo (LCM) y garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y calidad exigidos por la industria y la legislación nacional vigente.

2.2. *Objetivos específicos*

- i. Aplicar el Método de Elementos Finitos para realizar un análisis detallado de los esfuerzos y deformaciones en la estructura de la unidad semirremolque.
- ii. Verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos por el código BPVC Section XII en cuanto a esfuerzos y deformaciones admisibles para unidades de transporte de sustancias peligrosas.
- iii. Identificar y analizar áreas críticas de la estructura que puedan ser susceptibles a fallos o deformaciones significativas durante el servicio.
- iv. Contrastar los resultados obtenidos mediante el MEF con los límites permisibles establecidos por normativas y estándares internacionales aplicables a unidades de transporte de sustancias peligrosas.
- v. Proponer recomendaciones de diseño y modificaciones estructurales, en caso de ser necesario, para mejorar la integridad y seguridad de la unidad semirremolque.

La consecución exitosa de estos objetivos específicos permitirá alcanzar el objetivo general, brindando una evaluación completa y fundamentada de la integridad estructural de la unidad, y contribuirá directamente al proceso de obtención de la Licencia de Configuración de Modelo.

3. Plan de trabajo y carga horaria

El desarrollo de las actividades inherentes a la Práctica Profesional Supervisada (PPS) en cuestión, fueron planificadas según el cronograma de tareas mostrado en **Tabla 1**.

Tabla 1 – Cronograma de tareas.

DIAGRAMA DE GANTT											
Distribución en el tiempo de las actividades a realizar en la PPS y entrevistas con el/la Tutor/a Docente para informar el grado de avance del Plan de Trabajo											
N°	ACTIVIDADES	TIEMPO DE DURACIÓN									
		SEMANAS									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Entrevistas con tutor docente	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	Relevamiento de información (tanto del proceso de manufactura como de documentos legislativos y de diseño)	x	x	x	x						
3	Diseño del semirremolque en software CAD				x	x	x				
4	Simulación bajo diferentes condiciones según código ASME BPVC Sección XII						x	x			
5	Análisis de resultados							x	x		
6	Elaboración del conclusiones y propuestas de mejora								x	x	
7	Elaboración del informe final									x	x

Las tareas antes enumeradas se enmarcan en un espacio temporal de 200hs totales, comenzando la actividad el día 04/09/2.023 y finalizando el día 10/11/2.023, cumpliendo una jornada de 4hs diarias de lunes a viernes desde las 08:00hs hasta las 12:00hs. Es importante resaltar que muchas de las tareas demandan de horas computacionales, por lo tanto, fue posible realizar tareas de forma remota.

4. Justificativo de la PPS

4.1. La empresa

Tanques Fangio S.A. es una empresa familiar de capitales nacionales fundada hace ya más de 50 años, con base en *Ruta Provincial 32 Km 2, Pergamino, Buenos Aires, Argentina*. Destacada en la manufactura, reparación y modificación de cisternas para el transporte de sustancias líquidas, mayoritariamente combustibles, cuenta con todo el equipamiento tecnológico necesario para la fabricación de las siguientes líneas de productos:

- ⇒ Aluminio: semirremolques y cisternas.
- ⇒ Acero al carbono: semirremolques y cisternas.
- ⇒ Equipos térmicos.
- ⇒ Tanques petroleros.
- ⇒ Equipos especiales: tanques estercoleros y, modelos para combatir incendios y derrames químicos.



Imagen 1 – Tanques FANGIO.

4.2. LCM – Licencia de Configuración de Modelo

“La Licencia de Configuración de Modelo es un documento otorgado por la secretaria de Industria de la Nación, que acredita al fabricante de un vehículo nuevo, el cumplimiento de los requisitos de seguridad activa y pasiva, exigidos a un vehículo automotor, acoplado o semirremolque para ser librado al tránsito público”.

4.2.1. Pasos para la obtención de la LCM

Para la obtención de la LCM se debe fabricar la unidad de ensayo que cumpla con todos los requerimientos exigidos por la ley en base a la categoría en la que se enmarca la unidad en cuestión. Esta unidad será afectada a ensayos estáticos y dinámicos in-situ para garantizar su integridad. El ensayador emitirá el informe correspondiente donde se detalla si el modelo cumple o no los requisitos determinados por la ley.

En simultaneo a lo comentado anteriormente, se debe completar un formulario publicado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI (regulaciones automotrices) a modo de carpeta técnica de la unidad, en la que se describe, desde las dimensiones generales, pasando por el sistema de iluminación, características del sistema de rodado, hasta el estudio de ELEMENTOS FINITOS del chasis de la unidad.

5. Desarrollo de la temática

5.1. Ácido Clorhídrico 2+1

Este informe centra su enfoque en el análisis tensional y estudio de las deformaciones mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) de la estructura del semirremolque que la marca ofrece para el transporte de Ácido Clorhídrico. Este semirremolque, mostrado en *Imagen 2*, cuya configuración 2+1 (dos ejes fijos más un eje direccional neumático accionado cuando el tanque se encuentra con su carga máxima) dispone de una capacidad de almacenamiento de 24.240l seccionado en dos compartimentos independientes, uno de 15.150l y otro de 9.090l. Por norma se establece que este semirremolque debe contar con un grado de vaciado del 3%.



Imagen 2 – Ácido Clorhídrico 2+1.

Nro. Homologación		Volumen Real en Lts.		Inspección y Control		
		Compart.1	15 150	Fecha	Tipo	Contraste
Mod./N° Fab.	5475AG0070	Compart.2	9 090			
Año Construc.	2015	Compart.3				
Presión Prueba	50 KPa	Compart.4				
Presión Servicio	20 KPa	Compart.5				
Temp. Cálculo	A M B T °C	Compart.6				
Material Recip.	AC CARB	Compart.7				
Sustancia Transp.		Compart.8				
Tara		Total	24 240			
Peso Max. Autor.						
Transportista	TRUCK TURNER					

Imagen 3 – Placa de datos técnicos de la cisterna.

Según la FDS (Ficha de Datos de Seguridad), del Ácido Clorhídrico al 15% (ver *Anexo I*), su densidad es:

$$\rho_{\text{Ácido Clorhídrico}} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

De esta forma, podemos determinar que la masa de ácido transportada es:

$$m_{\text{Ácido Clorhídrico}} = 0,97 \times 24.240\text{l} \times 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cong 27.840\text{kg}$$

5.2. Cálculo de fuerzas reactivas

Como se verá en la medida que se avance en la lectura, algunas de las condiciones de simulación demandan de conocer la carga que se transmite a cada uno de los ejes y/o puntos de vinculación de la cisterna.

Las vinculaciones del semirremolque hacen que este sea un sistema hiperestático y, más complejo aún, con apoyos del tipo elásticos. El método analítico exacto para el cálculo de las reacciones resulta complejo y extenso. Como el objetivo no está en el desarrollo de un método para el cálculo de dichas reacciones se emplea un método sencillo pero práctico como se detalla a continuación,

Como datos de entrada para la descripción del sistema tenemos:

- ⇒ Tara del semirremolque: $10.100\text{kgf} = 99.081\text{N}$
- ⇒ Peso de la sustancia transportada: $27.840\text{kgf} = 273.111\text{N}$
- ⇒ Carga de cálculo: 372.192N

Supondremos una carga puntual aplicada en el centro de gravedad (estimado con la herramienta de modelado) del tanque cisterna empleado para la simulación, el cual se encuentra a $5.615,1\text{mm}$ de la cara frontal del chasis como se muestra en *Imagen 4*.

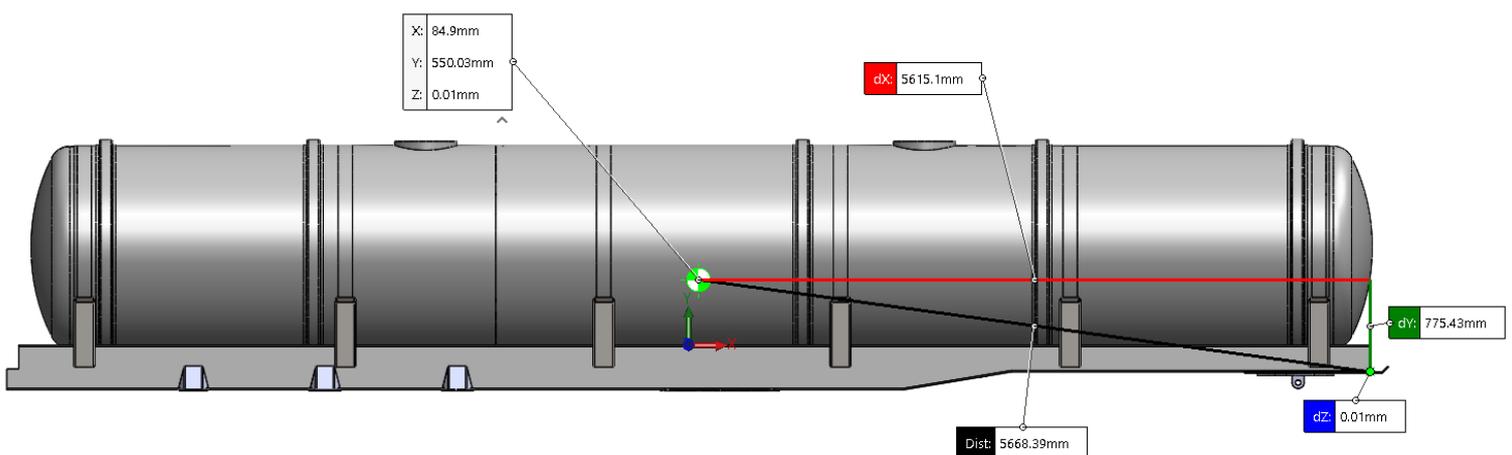


Imagen 4 – Centro de gravedad del semirremolque.

En **Imagen 5** se plantea el modelo estático para el cálculo de las reacciones.

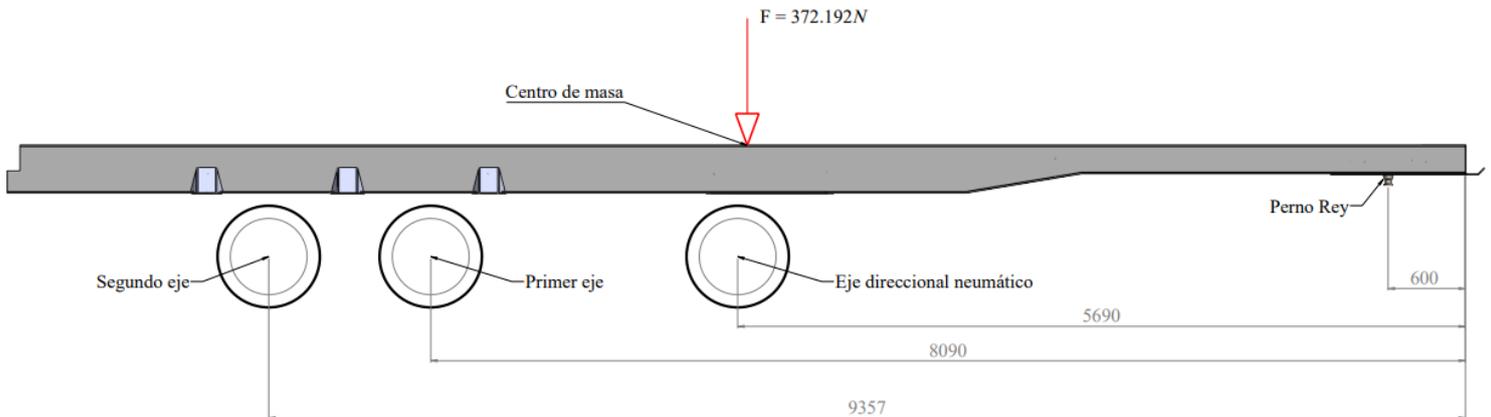


Imagen 5 – Modelo hiperestático viga madre.

Como se mencionó párrafos más arriba, se obtiene un sistema estructural hiperestático, ya que existen 4 reacciones (una por cada uno de los ejes y otra en el perno rey), por ende 4 incógnitas, para resolver con tan solo 3 ecuaciones fundamentales.

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M = 0$$

Con el fin de transformar el modelo en cuestión en un sistema isostático, se reduce todo el sistema de rodado en una única vinculación a partir de su centro geométrico como se muestra en **Imagen 6**.

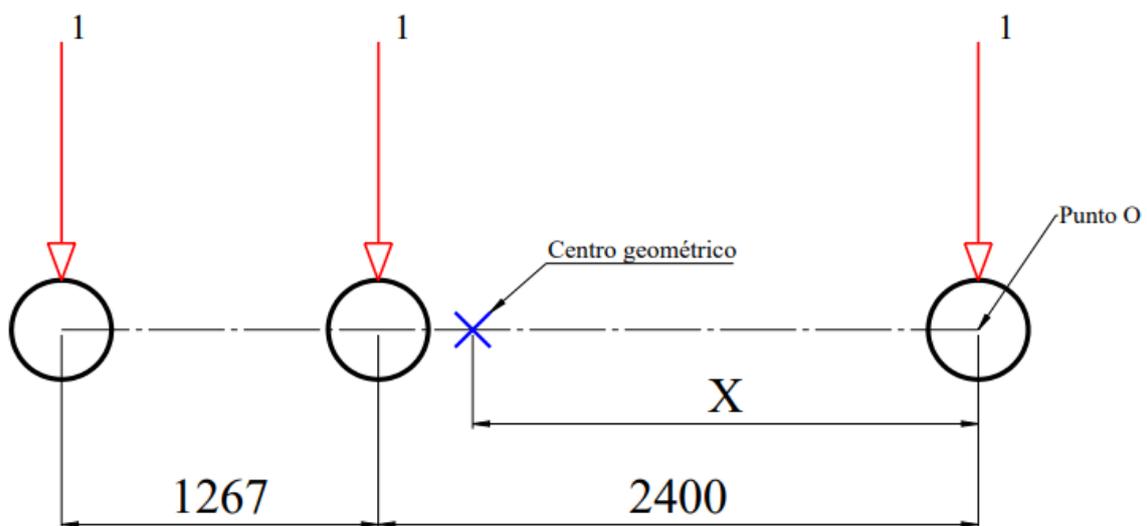


Imagen 6 – Centro geométrico para el sistema de rodado.

Para determinar la ubicación del centro geométrico se hace uso del equilibrio de los momentos generados por las cargas unitarias con respecto al punto O.

$$\sum M_O = 0$$

$$1 \times X - 1 \times (2.400\text{mm} - X) - 1 \times (3.667\text{mm} - X) = 0$$

$$X - 2.400\text{mm} + X - 3.667\text{mm} + X = 0$$

$$X = 2.022\text{mm}$$

Bajo estas condiciones se puede establecer el sistema isostático mostrado en **Imagen 7**, para luego poder determinar las reacciones con las ecuaciones del equilibrio estático.

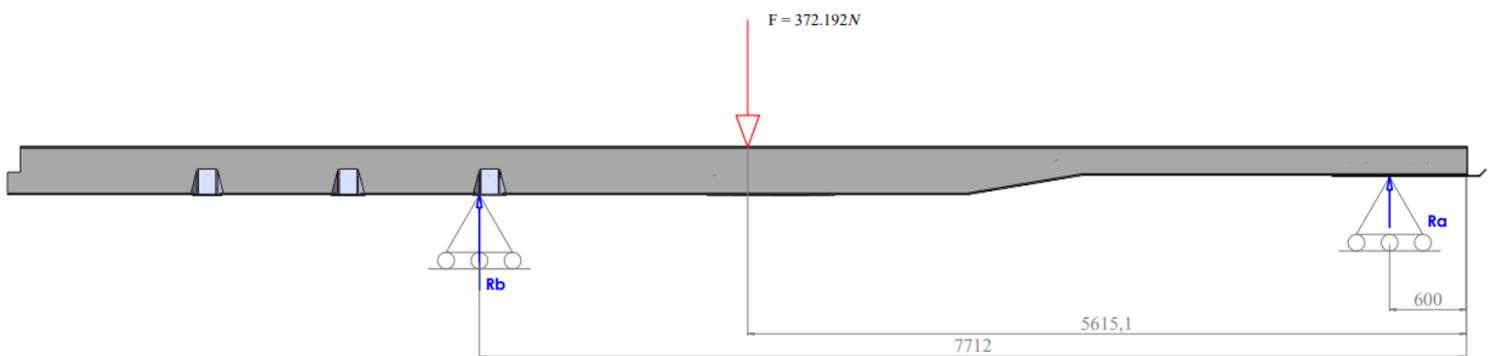


Imagen 7 – Simplificación de modelo a isostático -> Viga madre.

$$\sum F_{\text{Verticales } \uparrow +} = 0$$

$$R_a + R_b = 372.192\text{N}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$372.192\text{N} \times 5.615,1\text{mm} - R_b \times 7.712\text{mm} = 0$$

Observación: Se contemplan los momentos como positivos a aquellos que tiendan al giro de la estructura en sentido antihorario.

Despejando las incógnitas y reemplazando debidamente se obtiene que las reacciones toman los siguientes valores:

$$R_a = 101.199\text{N}$$

$$R_b = 270.993\text{N}$$

Determinada la carga total que se trasmite al sistema de rodadura, el paso siguiente es descomponer dicha reacción totalizadora en las cargas individuales por cada eje. Para resolver esta situación se supone que cada uno de los dos ejes con suspensión mecánica por ballestas absorbe la misma carga cada uno. De esta forma se toma la reacción común a los dos ubicada en el centro de dichos ejes.

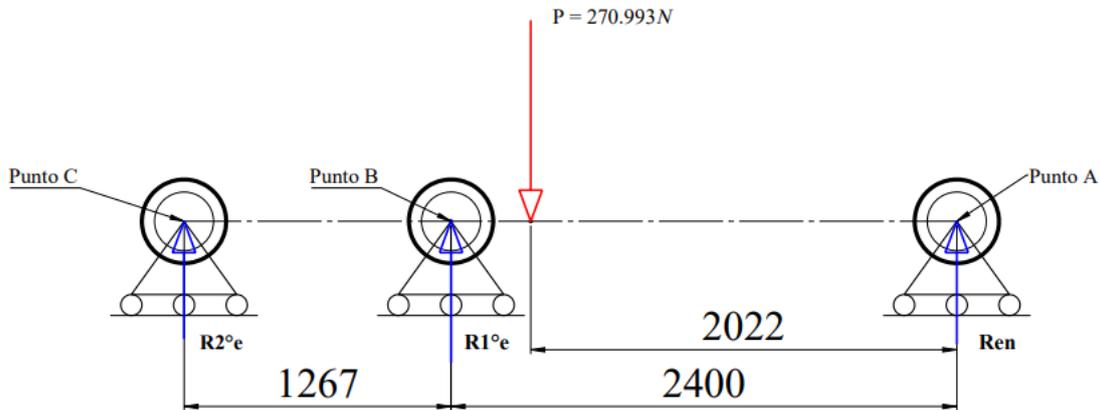


Imagen 8 – Sistema hiperestático para modelado de ejes.

$$\sum F_{\text{Verticales } \uparrow} = 0$$

$$R_{em} + R_{en} = 270.993N$$

$$\sum M_A = 0$$

$$270.993N \times 2.022mm - R_{em} \times 3.033,5mm = 0$$

Despejando y reemplazando debidamente se obtiene:

$$R_{em} = 180.632N$$

$$R_{en} = 90.361N$$

Finalmente, las cargas en cada uno de las vinculaciones se resumen de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \text{Carga Perno Rey} = 101.199N \\ \text{Carga Eje Neumático} = 90.361N \\ \text{Carga Primer Eje} = 90.316N \\ \text{Carga Segundo Eje} = 90.316N \end{cases}$$

NOTA: Las cargas reactivas son calculadas haciendo uso de un modelo estático infinitamente rígido y con vinculaciones ideales. La realidad del semirremolque escapa a las condiciones de cálculo. La primera desviación es que contamos con vinculaciones elásticas, ya no rígidas, esto hace que las reacciones se reacomoden continuamente. La segunda y, tal vez de mayor efecto, es que la presión de los pulmones que dan rigidez a la suspensión neumática del eje direccional se asigna manualmente. Esto hace que, si la presión designada es muy alta, este eje será quien absorba la mayor carga reactiva desbalanceado las demás reacciones. Como conclusión, los resultados obtenidos son orientativos y para fines de simulación.

5.3. Modelado de la cisterna

5.3.1. Gemelo digital

Por parte de la oficina técnica de Tanques Fangio fue posible acceder al modelo 3D del tanque cisterna para el transporte de Ácido Clorhídrico. Este gemelo digital, como se muestra en *Imagen 9*, modelado en con un software para tal fin, consta de un ensamblaje de, aproximadamente, 550 piezas. Cabe destacar que en este diseño se omite la representación del eje direccional neumático, por lo que se deberá idealizar la vinculación entre el chasis y el eje en cuestión para modelar la vinculación elástica.

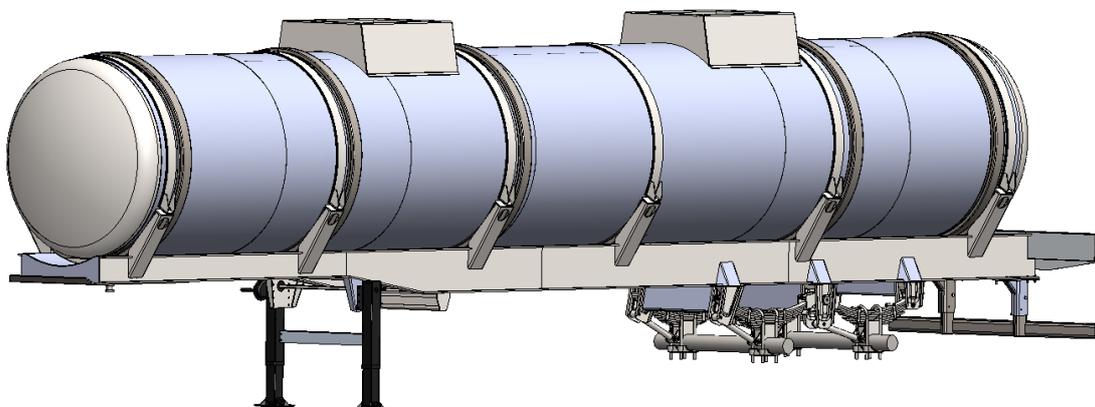


Imagen 9 - Modelo 3D de la cisterna.

Es significativo mencionar que la importancia de los gemelos digitales radica en la obtención de los planos de cada una de las piezas, subconjuntos y conjuntos, que permiten comunicar los procesos de fabricación y obtención (sea de manufactura propia o comercial) de cada parte para llegar al producto final. Además, permite confeccionar un catálogo interno donde se puede conocer la trazabilidad de cada uno de los componentes que conforman al semirremolque. Es por ello que cada uno de estos gemelos cuenta con una gran cantidad de piezas.

5.3.2. Acondicionamiento de modelo

La primera y, tal vez, más importante de las etapas para la simulación de un modelo 3D es acondicionar dicho gemelo. Este punto es de vital importancia ya que influye directamente en los tiempos demorados para correr la simulación y también, en los resultados obtenidos. Un modelo con una gran cantidad de piezas y, por ende, mayor cantidad de relaciones de interacción entre componentes, demorará más tiempo que un modelo optimizado, en el que las piezas que lo conforman sean únicamente aquellas de gran valor estructural. En *Imagen 10* se puede ver el modelo optimizado y el usado para correr las simulaciones. Este modelo consta de 55 piezas optimizadas.

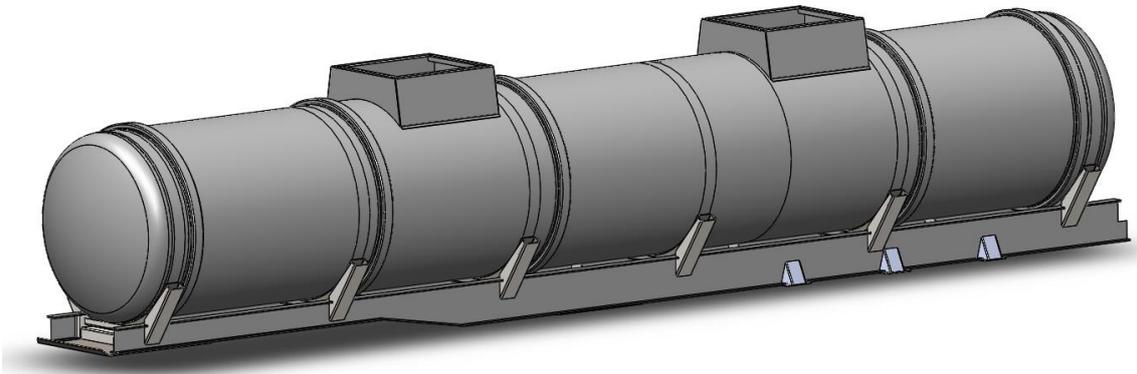


Imagen 10 – Modelo 3D optimizado.

Este semirremolque está compuesto, a grandes rasgos, por dos subconjuntos. Por un lado, se hace alusión al chasis o estructura portante y por el otro lado a la cisterna o tanque de almacenamiento como se muestra en *Imagen 11*.

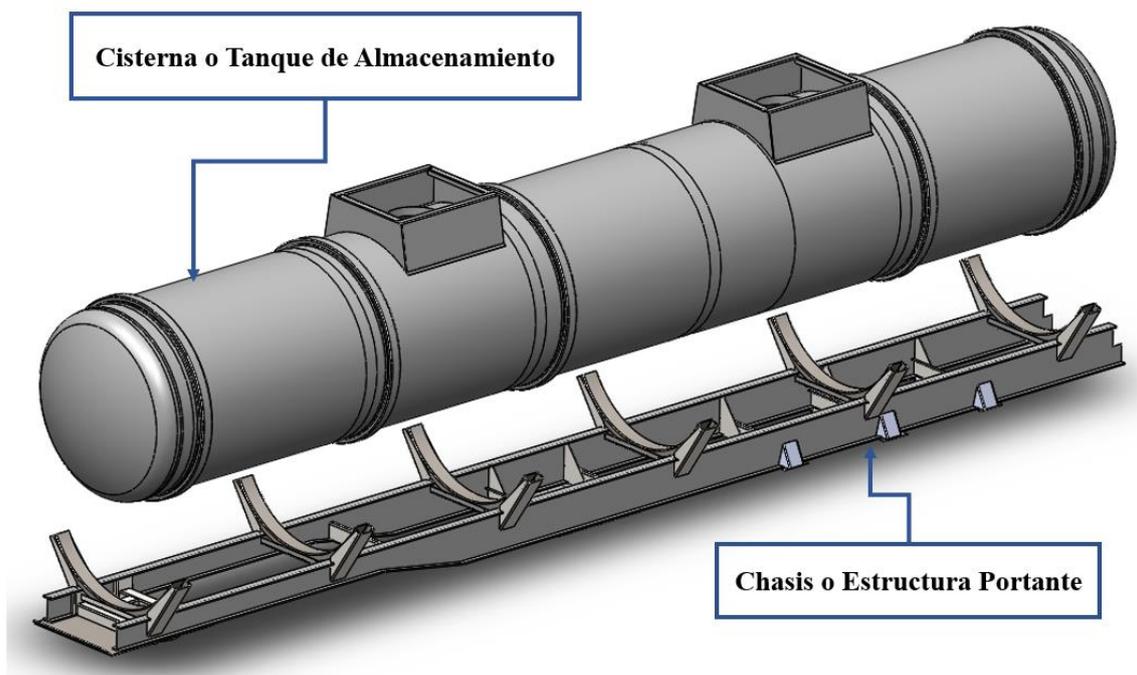


Imagen 11 - Vista explosionada del semirremolque.

Es sustancial tomarse el tiempo para comprender como es el interior de la cisterna, dado que en ella se aplicarán las cargas externas. Esta queda conformada por una envolvente diámetro interno 1.700mm y espesor $6,35\text{mm}$ ($1/4''$), dos cabezales toriesféricos laterales y dos cabezales toriesféricos internos espesor $6,35\text{mm}$ ($1/4''$), 5 anillos rigidizadores espesor 4mm , dos bocas de inspección diámetro interno $503,7\text{mm}$ y espesor $6,35\text{mm}$ ($1/4''$) y una jaula antivuelco por cada boca de inspección conformada con chapa metálica plegada y soldada espesor $6,35\text{mm}$ ($1/4''$). Los antivuelco no se contemplan en las simulaciones porque no aportan rigidez estructural.

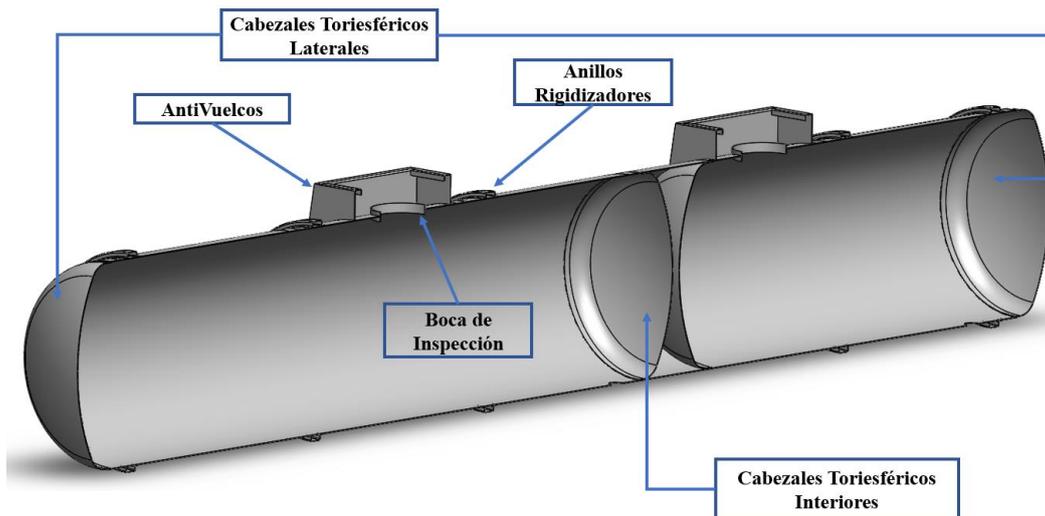


Imagen 12 – Vista en corte de la cisterna.

El componente que mayor atención debe tener en este diseño es el cabezal toriesférico, ya que es el encargado de garantizar la estanqueidad de los compartimentos. En **Imagen 13** se muestran las dimensiones (en mm) de los cabezales empleados en este semirremolque.

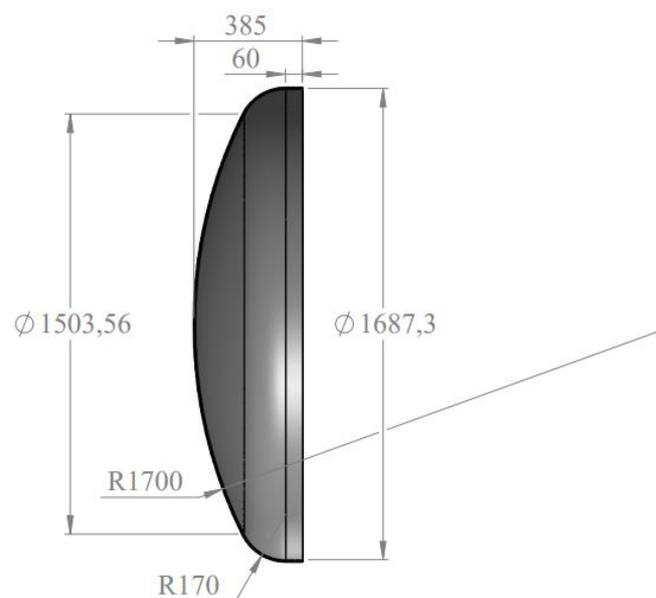


Imagen 13 – Dimensiones del cabezal toriesférico.

Buscando optimizar aún más los componentes del conjunto, se toma como ejemplo la eliminación de agujeros efectuados para poder generar la unión entre componente mediante soldadura, como el caso particular de la Escuadra Travesaño. Estos agujeros hacen que el mallado de estas piezas se distorsionen y generen concentración de nodos que hace elevar los tiempos de simulación y, además, generar concentración de tensiones que en la realidad no existen por ser eliminados con metal de aporte. A modo de ejemplo podemos ver **Imagen 14**, donde se muestra la Escuadra Travesaño optimizada y la misma pieza con los agujeros para soldadura.

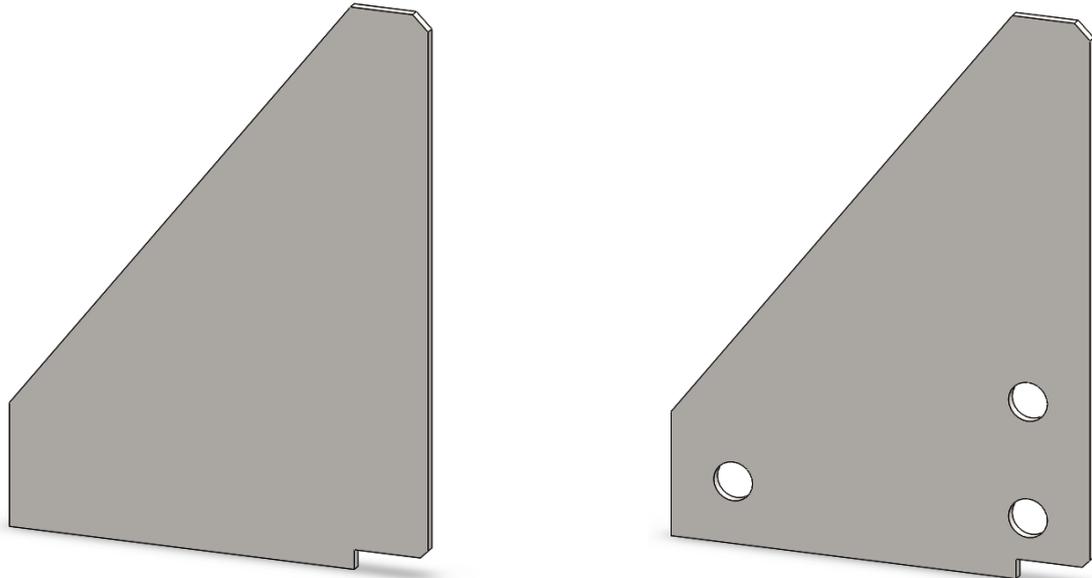


Imagen 14 – Optimización de piezas particulares. (Escuadra Travesaño)

5.4. Verificación analítica de componentes

Las verificaciones analíticas resueltas en esta sección se fundamentan en los códigos ASME BPVC.XII y ASME BPVC.II.D.M-2023.

5.4.1. Envoltente cilíndrica

5.4.1.1. Verificación a presión interna

La nomenclatura, propia del código empleado, utilizada para los cálculos posteriores se describe a continuación:

- i. E es la eficiencia en las uniones que conforman a la envoltente. Este valor se determina según el ASME BPVC.XII – Part TW – Table TW-130.4, y toma el valor de $E=0,85$, ya que se realizan inspecciones en las soldaduras en puntos particulares.
- ii. P es la presión interna de diseño.
- iii. R es el radio interior de la envoltente.
- iv. R_0 es el radio exterior de la envoltente. Radio interior + espesor de chapa.
- v. S es la tensión admisible/permisible.
- vi. t es el espesor de chapa utilizado para la fabricación de la envoltente.

El código ASME BPVC.XII establece que el espesor de diseño mínimo requerido permitido para la envolvente deberá ser el mayor espesor de los siguientes:

⇒ Tensiones circunferenciales:

$$t = \frac{P \times R}{S \times E - 0,6P} = \frac{(0,21MPa) \times (1.700mm)}{(114MPa) \times 0,85 - 0,6 \times (0,21MPa)} = 2,92mm$$

⇒ Tensiones longitudinales:

$$t = \frac{P \times R}{2 \times S \times E + 0,4 \times P} = \frac{(0,21MPa) \times (1.700mm)}{2 \times (114MPa) \times 0,85 + 0,4 \times (0,21MPa)} = 1,84mm$$

De esta forma, se determina que, para que la envolvente cilíndrica verifique a presión interna, el espesor mínimo debe ser 2,92mm. La envolvente utilizada en la fabricación del semirremolque en cuestión cuenta con un espesor 6,35mm.

5.4.1.2. Verificación a presión externa

La nomenclatura, propia del código empleado, utilizada para los cálculos posteriores se describe a continuación:

- i. A es un factor determinado a partir de la Sección II, Parte D, Subparte 3, Figura G y utilizado para ingresar la tabla de materiales aplicable en la Sección II, Parte D, Subparte 3.
- ii. B es un factor determinado a partir de la tabla de materiales aplicable en la Sección II, Parte D, Subparte 3 para la temperatura máxima de diseño del metal.
- iii. D_0 es el diámetro exterior de la envolvente.
- iv. E es el módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.
- v. L es la máxima distancia entre dos anillos rigidizadores consecutivos.
- vi. P_a es la máxima presión externa aceptada por la envolvente.
- vii. R_0 es el radio exterior de la envolvente.
- viii. t es el espesor de la chapa utilizada para la fabricación de la envolvente.

En primer lugar, se debe verificar que carta de presión externa aplica para el acero ASTM A36, seleccionado como equivalente del acero F-26. Ingresando al ASME Section II, Subpart I, Table 1A, la carta de presión externa correspondiente es la CS-2.

El código establece que el espesor mínimo requerido de una carcasa cilíndrica con valores $\frac{D_0}{t}$ no inferiores a 10, bajo presión externa, se determinará mediante el siguiente procedimiento.

Nota: El valor L , es decir, la máxima distancia entre dos anillos rigidizadores consecutivos de la cisterna la obtenemos del gemelo digital como se muestra en **Imagen 15** y su valor es $L=2.135mm$.

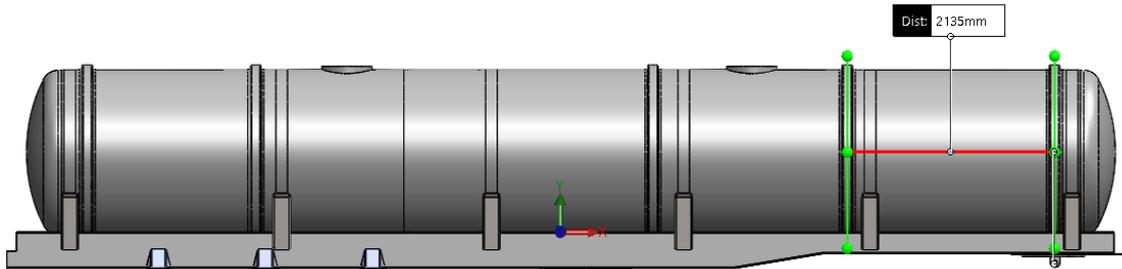


Imagen 15 – Distancia máxima entre anillos rigidizadores.

$$\frac{L}{D_0} = \frac{2.135mm}{1.712,7mm} = 1,25$$

$$\frac{D_0}{t} = \frac{1.712,7mm}{6,35 mm} = 270$$

De la Sección II, Parte D, Subparte 3, Figura G, entrando con las relaciones obtenidas, se tiene que $A=0,002$. Con este valor y la carta de presión externa (Sección II, Parte D, Subparte 3, Figura CS-2) para el acero ASTM A36 cuyo modulo elástico es mayor a $207MPa$ a $150^{\circ}C$, se obtiene un valor del coeficiente $B=117MPa$. Finalmente, la máxima presión externa admitida por la envolvente resulta:

$$P_a = \frac{4 \times B}{3 \times \left(\frac{D_0}{t}\right)} = \frac{4 \times 117MPa}{3 \times 270} = 0,58MPa$$

5.4.2. Cabezas toriesféricas

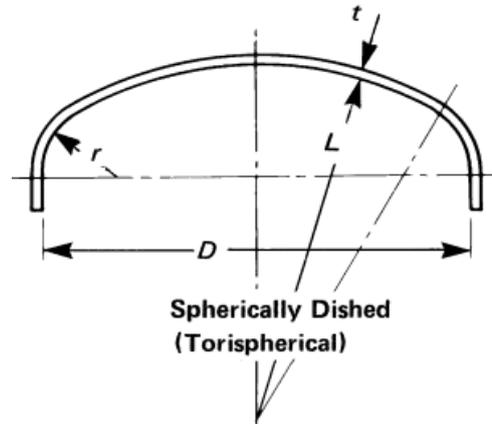


Imagen 16 – Dimensiones característica -> Cabezal toriesférico.

5.4.2.1. Verificación a presión interna

La nomenclatura, propia del código empleado, utilizada para los cálculos posteriores se describe a continuación:

- i. D es el mayor diámetro interior del cabezal.
- ii. E_{RT} es el módulo de elasticidad del material de diseño a 20°C .
- iii. E_{ST} es el módulo de elasticidad del acero a 20°C .
- iv. E_T es el módulo de elasticidad a la máxima temperatura de diseño.
- v. L es el radio esférico o de corona.
- vi. P es la presión interna de diseño.
- vii. r es el radio interior del nudillo.
- viii. S es la tensión admisible/permisible para el diseño.
- ix. t es el mínimo espesor requerido para el diseño del cabezal.

Según el código en cuestión el espesor mínimo requerido de un cabezal toriesférico que tenga relación $0,002 \leq \frac{t}{L} \leq 0,06$ (en este caso $t/L=0,004$ y $r/D=0,1$) será el mayor de los espesores calculados según las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{P \times L \times M}{2 \times S \times E - 0,2 \times P} = \frac{(0,21\text{MPa}) \times (1.693,56\text{mm}) \times 1}{2 \times (114\text{MPa}) \times 0,85 - 0,2 \times (0,21\text{MPa})} = 1,84\text{mm}$$

$$t = \frac{3 \times P \times L \times K \times E_{RT}}{4 \times S_a \times E_T} = \frac{3 \times (0,21\text{MPa}) \times (1.693,56\text{mm}) \times (4,69) \times (210.000\text{MPa})}{4 \times (792,9\text{MPa}) \times (210.000\text{MPa})} = 1,58\text{mm}$$

Donde:

$$S_a = 792,9\text{MPa} \times \frac{E_{RT}}{E_{ST}}$$

Para este caso, al utilizar acero F-26 y funcionar a temperaturas normales, el factor S_a toma el valor de $792,9\text{MPa}$.

Finalmente, se concluye que el espesor mínimo requerido es de $1,84\text{mm}$. El cabezal que forma parte de la cisterna cuenta con un espesor $6,35\text{mm}$, por lo tanto, verifica bajo presión interna.

Los valores de los factores M y K se obtienen de **Tabla 2** y **3**.

Tabla 2 – Valores del factor M. Fuente: Código ASME BPVC.XII.

t/L	M for r/D = 0.06	M for r/D = 0.07	M for r/D = 0.08	M for 0.08 $< r/D \leq 0.2$
0.002	1.00	1.00	1.00	1.00
0.004	1.00	1.00	1.00	1.00
0.006	1.28	1.00	1.00	1.00
0.008	1.41	1.20	1.00	1.00
0.010	1.41	1.26	1.10	1.00
0.012	1.38	1.25	1.13	1.00
0.016	1.31	1.21	1.12	1.00
0.020	1.25	1.17	1.08	1.00
0.030	1.14	1.08	1.01	1.00
0.040	1.07	1.01	1.00	1.00
0.060	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabla 3 – Valores del factor K. Fuente: Código ASME BPVC.XII.

t/L	K for r/D = 0.06	K for r/D = 0.08	K for r/D = 0.10	K for r/D = 0.14	K for r/D = 0.17	K for r/D = 0.20
0.002	7.87	6.29	5.24	3.95	3.31	2.81
0.004	6.77	5.60	4.69	3.49	2.93	2.50
0.006	6.04	5.14	4.38	3.27	2.73	2.33
0.008	5.51	4.78	4.14	3.13	2.60	2.21
0.010	5.11	4.49	3.93	3.02	2.51	2.13
0.012	4.79	4.25	3.76	2.93	2.44	2.06
0.016	4.31	3.87	3.47	2.77	2.33	1.97
0.020	3.96	3.58	3.24	2.63	2.24	1.91
0.030	3.48	3.10	2.84	2.37	2.07	1.79
0.040	3.32	2.97	2.69	2.23	1.95	1.72
0.060	3.12	2.80	2.56	2.17	1.92	1.71

5.4.2.2. Verificación a presión externa

Como la cisterna se fabrica en su totalidad con el mismo material, la carta de presión externa para la envolvente aplica también para el cabezal toriesférico.

El código establece que la máxima presión externa admitida por un cabezal elipsoidal/toriesférico que tenga dicha presión aplicada en el lado convexo, ya sea sin costuras o de construcción armada con juntas a tope, será la determinada por el siguiente procedimiento.

Se debe obtener el coeficiente A , el cual contempla la relación entre el radio máximo del cabezal y el espesor del mismo (ver **Imagen 13**).

$$A = \frac{0,125}{\left(\frac{R_0}{t}\right)} = \frac{0,125}{\left(\frac{1.700mm}{6,35mm}\right)} = 0,000467 \cong 0,0005$$

La determinación del factor B para el caso del cabezal se realiza empleado la misma gráfica (Sección II, Parte D, Subparte 3, Figura CS-2) empleada para la envolvente. De esta forma, este factor toma el siguiente valor $B=50MPa$. Por lo tanto, la presión externa máxima admitida por el cabezal resulta:

$$P_a = \frac{B}{\left(\frac{R_0}{t}\right)} = \frac{50MPa}{\left(\frac{1.706,35 mm}{6,35 mm}\right)} = 0,19MPa$$

5.5. Definición de las condiciones de contorno o inputs

Los resultados obtenidos con el método de elementos finitos dependen en gran medida de las condiciones de borde que se asignan al modelo a simular. Es necesario entonces procurar replicar, dentro de las opciones que dan los softwares de simulación, dichas condiciones y que resulten semejantes a las condiciones en la que el semirremolque se somete a diario.

5.5.1. Material

Como material empleado para la fabricación y simulación de todos los componentes que conforman al semirremolque se utiliza acero al carbono calidad F-26. Las propiedades mecánicas del mismo quedan definidas según norma IRAM-IAS U 500-42.

Determinado el material y sus propiedades es necesaria la creación del mismo en la biblioteca de materiales del software como se muestra en *Imagen 17*. En las propiedades del material creado podemos ver que algunas de ellas se resaltan en color rojo, esto indica que son las propiedades esenciales para poder correr la simulación.

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de aplicación Favoritos Chapa metálica

Propiedades de material
No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: Aceros calidad comercial

Nombre: F-26

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción: -

Origen:

Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	207000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Módulo cortante		N/mm ²
Densidad de masa	7850	kg/m ³
Límite de tracción	400	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	250	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m·K)
Calor específico		J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Imagen 17 – Propiedades del acero F-26.

Además de las propiedades físicas y mecánicas del material en cuestión, se debe determinar la tensión admisible/permisible, ya que esta no depende del material, sino que depende de la normativa bajo la cual se rige el estudio en cuestión. Para esto, se considera una equivalencia entre el acero F-26 y el acero ASTM A36 como se muestra en **Imagen 18**, ya que el acero empleado para la fabricación del semirremolque es de carácter nacional.

Chapa F-26 (IRAM IAS U 500-42)				ASTM A36			
Propiedades mecánicas				Propiedades mecánicas			
Rm	MPa	400 a 550		Rm	MPa	400 a 550	
Re (min.)	MPa	250		Re (min.)	MPa	250	
A (min.)	%	23	(L ₀ = 50 mm)	A (min.)	%	23	(L ₀ = 50 mm)
Composición química				Composición química			
C	%	0,210	Valores máximos	C	%	0,250	Valores máximos
Si	%	0,350		Si	%	0,400	
P	%	0,030		P	%	0,040	
S	%	0,035		S	%	0,050	
CE%	-	0,45					

Imagen 18 – Equivalencia acero F-26 y acero ASTM A36.

Como primera medida, se deben conocer las propiedades físicas/mecánicas del acero ASTM A36 reportados por ASME Section II, Part D, Subpart 1, Table 1A, la cual establece lo siguiente:

- ✓ Resistencia ultima: $S_U = 400MPa$
- ✓ Resistencia a la fluencia: $S_Y = 250MPa$

Con estos parámetros y los valores de resistencia establecidos para el acero F-26, se determina la tensión admisible/permisible (S_{all}).

El procedimiento establece que primero se determina la tensión admisible según relación de resistencias últimas de los materiales.

$$E_t = \frac{\text{Material test report tensile strength}}{\text{Section II, Part D tensile strength}} = \frac{400MPa}{400MPa} = 1$$

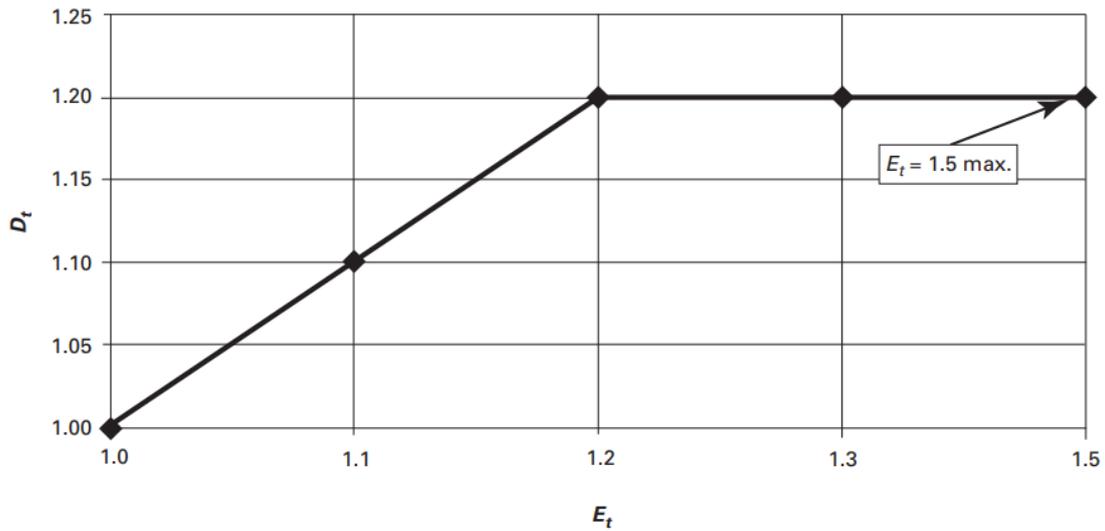


Imagen 19 – Rango máximo de propiedades de resistencia última. Fuente: ASME BPVC.XII.

Entrando al gráfico mostrado en **Imagen 19** con $E_t = 1$ se obtiene que:

$$D_t = 1$$

Por lo que la tensión admisible toma el siguiente valor:

$$S_{all} = D_t \frac{S_U}{3,5} = 114MPa$$

En segunda instancia se determina la tensión admisible según la relación entre resistencias a la fluencia de los materiales.

$$E_y = \frac{\text{Material test report yield strength}}{\text{Section II, Part D yield strength}} = \frac{250MPa}{250MPa} = 1$$

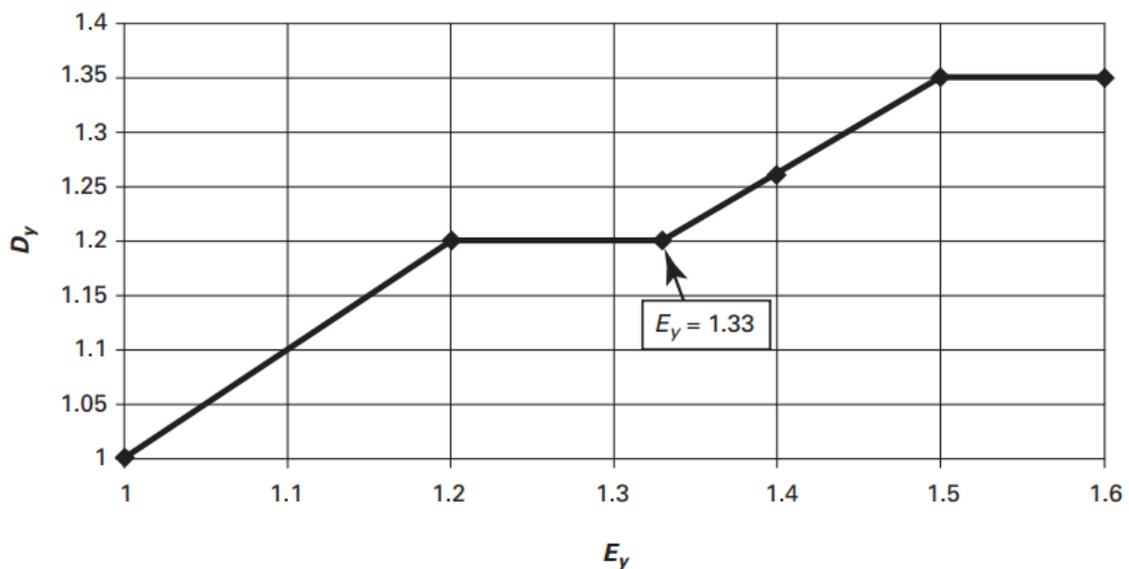


Imagen 20 - Rango máximo de propiedades de resistencia a la fluencia. Fuente: ASME BPCV.XII.

Entrando al gráfico mostrado en **Imagen 20** con $E_y = 1$ se obtiene que:

$$D_y = 1$$

Por lo que la tensión admisible toma el siguiente valor:

$$S_{all} = D_y \frac{S_Y}{3,5} = 167MPa$$

Se concluye entonces, que la tensión admisible/permisible para el material con el que se fabrica y simula el modelo será $114MPa$.

5.5.2. Sujeciones/Vinculaciones

El modelado de las sujeciones/vinculaciones pueden ser trabajados como dos grupos bien definidos. Por un lado, el apoyo del semirremolque en la quinta rueda o plato de enganche y, por otro lado, la transferencia de carga del semirremolque al sistema de suspensión mecánica y eje direccional neumático.

⇒ Apoyo en quinta rueda.

Para replicar la vinculación entre el semirremolque y el tractor se modela un plato de enganche que cumpla con las dimensiones de un plato comercial, pero sin profundizar en los detalles constructivos ya que, para la simulación es tratado como un sólido rígido, por lo tanto, indeformable, con esto se logra que se replique la vinculación pero que su diseño no interfiera en los resultados obtenidos. Sobre este plato se asigna una restricción del tipo bisagra como se muestra en **Imagen 21** y se supone que el planchón de enganche de la cisterna se encuentra rígidamente unido a dicho plato (la intención no es evaluar la integridad del perno rey sino de la estructura). La restricción tipo bisagra elimina posibilidad de traslaciones en cualquiera de los 3 ejes cartesianos (X, Y, Z) pero no restringe el giro sobre el eje concéntrico a las caras cilíndricas del pasador que vincula el chasis del tractor con el plato.

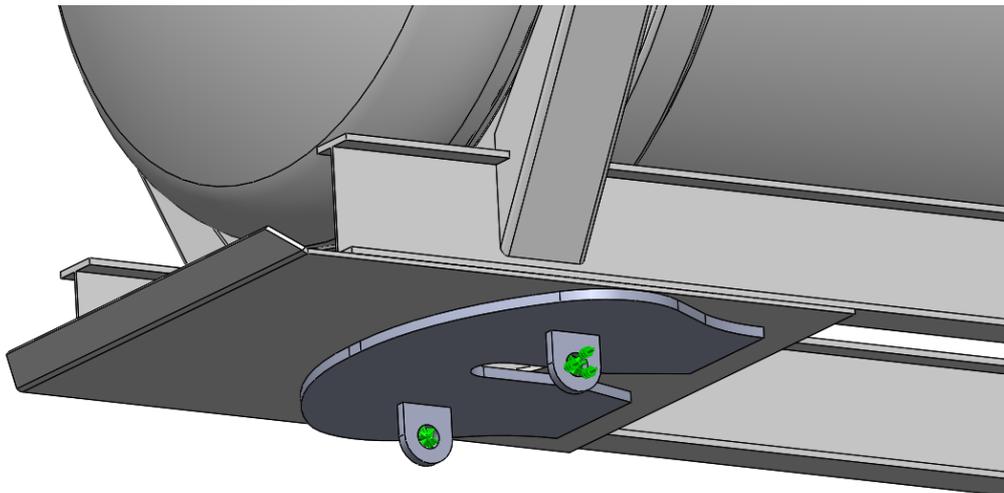


Imagen 21 – Modelado quinta rueda.

⇒ Suspensión mecánica.

El semirremolque en estudio cuenta con un sistema de suspensión mecánica por medio de ballestas de la marca Aneiros S.C.A. Para su modelado, el proveedor del conjunto elástico facilitó los ensayos de deflexión realizados sobre el sistema de suspensión, del cual se puede obtener la curva *cargas vs deflexión* como se muestra en **Imagen 22**, y de esta forma determinar un módulo elástico del conjunto.

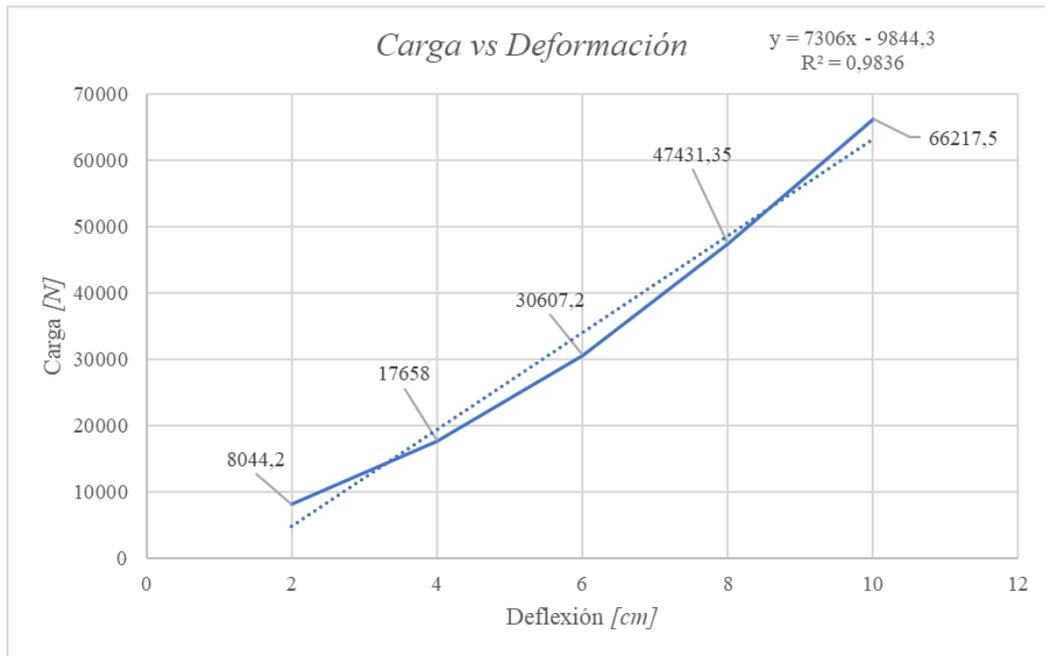


Imagen 22 – Curva de deflexión de la suspensión mecánica.

En vista de la curva *carga vs deformación* obtenida es necesario realizar una aproximación lineal de la misma y de esta forma conocer la pendiente de dicha recta, valor que determinará la constante elástica de las ballestas. Se determina, entonces, que el módulo elástico de la suspensión mecánica toma el siguiente valor:

$$\text{Modulo elástico} = 730,6 \frac{N}{mm} = 730.600 \frac{N}{m}$$

Conocido este valor es posible modelar la vinculación con soportes del tipo elástico como se muestra en **Imagen 23**. Además, asignamos la misma rigidez elástica al vínculo con el eje direccional neumático para balancear las cargas y equilibrar el modelo.

Además de asignarle valor elástico al desplazamiento vertical, se debe asignar un valor elástico tendiendo a “infinito” para el desplazamiento en sentido transversal a la dirección de circulación de la cisterna para estabilizar el modelo.

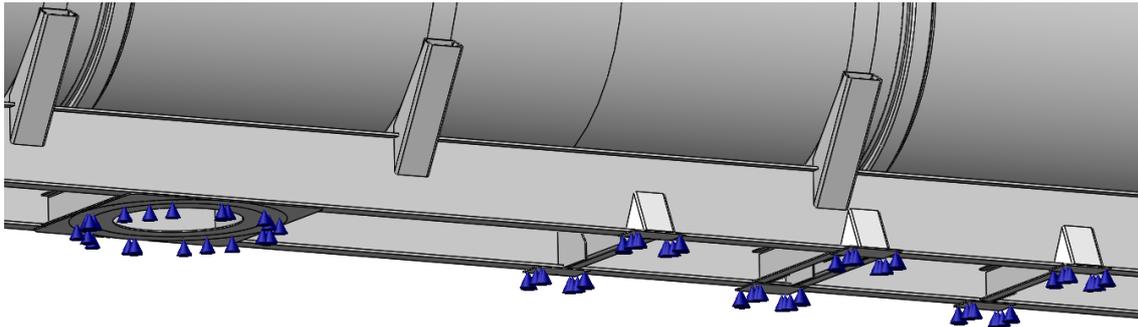


Imagen 23 – Vinculación elástica.

5.5.3. Mallado del modelo

Para poder reducir al mínimo posible los tiempos de simulación sin perder precisión en los resultados debemos trabajar en el mallado del modelo. Es común utilizar el administrador de vaciado o elementos Shell en piezas que poseen espesores delgados frente a sus demás dimensiones constitutivas. En estos, los esfuerzos en dirección del espesor son insignificantes, podemos decir entonces que un sólido tridimensional se transforma en una placa bidimensional. Por lo tanto, sobre estas el mallado se vuelve óptimo.

En el caso de la cisterna se utilizan elementos Shell en la envolvente y en los cabezales toriesféricos.

El mallado general del semirremolque se efectúa con una malla cuadrática de alto orden basada en curvatura cuyo tamaño de elemento parte desde 50mm hasta 5mm con una relación de crecimiento de elementos de 1,2. Este mallado genera inconvenientes en algunas piezas particulares del modelo. Para el caso de la envolvente de la cisterna y los cabezales toriesféricos este mallado resulta muy pequeño por lo que genera un elevado número de nodos en cada pieza. Para suplir esta problemática se aplica un control de mallado en cada una de estas piezas permitiendo que en ellas se genere un mallado más grueso. Al contrario de esto, para el caso de las vigas del chasis, este mallado resulta grueso, por lo que se genera un control de mallado para cada una de las vigas madre.

El detalle final de la malla utilizada para la simulación de todas las condiciones de estudio se muestra en **Imagen 24**, mientras el modelo mallado se muestra en **Imagen 25**.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Condición A) Carga Estática (-Predeterminado-)
DetallesTipo de malla	Malla mixta
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Verificación jacobiana para el vaciado	Activar
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	45 mm
Tamaño mín. de elemento	2,25 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	1292605
Número total de elementos	636839
Mallar de nuevo las piezas fallidas de forma independiente	Desactivar
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:05:20
Nombre de computadora	GUIDO-LAPTOP

Imagen 24 – Parámetros de mallado.

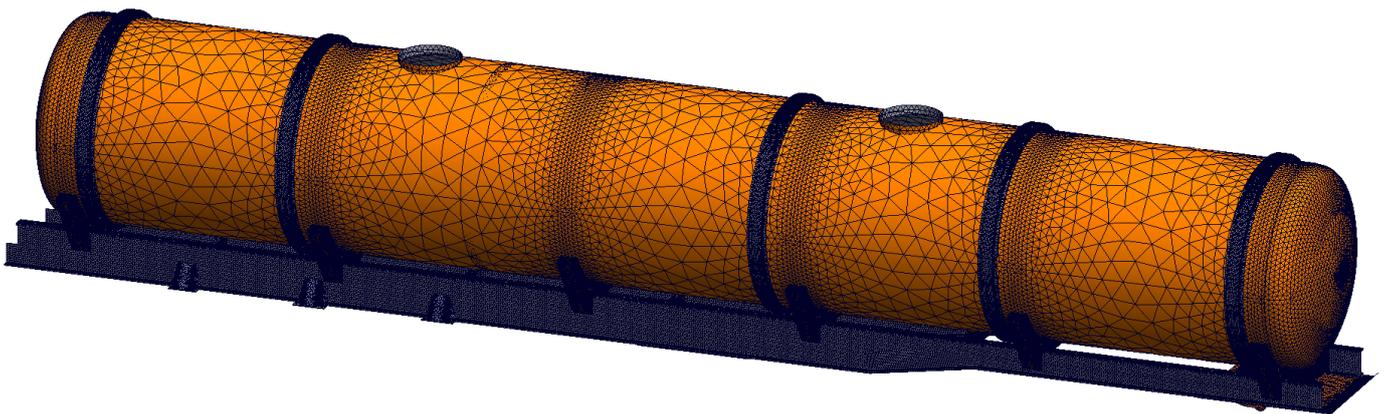


Imagen 25 – Modelo mallado.

De suma importancia es remarcar que cuanto más fino sea el mallado mejor serán los resultados obtenidos, pero mayor aún es la demanda de recursos computacionales. Debido a que las simulaciones presentadas en este documento fueron corridas con una Notebook, el mallado debió ser optimizado al máximo. Esto no quiere decir que los resultados obtenidos no sean verídicos. Sino que se buscó el mallado tal que, al incrementar la tolerancia de los elementos, los resultados obtenidos mantengan su valor de convergencia. Esto permite determinar que, afinar la malla no justifica el incremento de tiempo de simulación porque los resultados convergen al valor estable.

Uno de los parámetros más utilizados para evaluar la calidad de la malla usada es el cociente de aspecto de la malla. Este cociente indica que tan deformados están los elementos tetraédricos de la malla en cuestión. Un elemento muy distorsionado producirá resultados equivocados. Se establece, como regla práctica, que el cociente de aspecto del mallado tiene que estar por debajo de 7. En *Imagen 26* se muestra el trazado del cociente de aspecto del semirremolque. Se puede ver que mayoritariamente se cumple la condición, aunque existen minuciosas zonas donde los elementos están distorsionados pero que no son estructuralmente importantes.

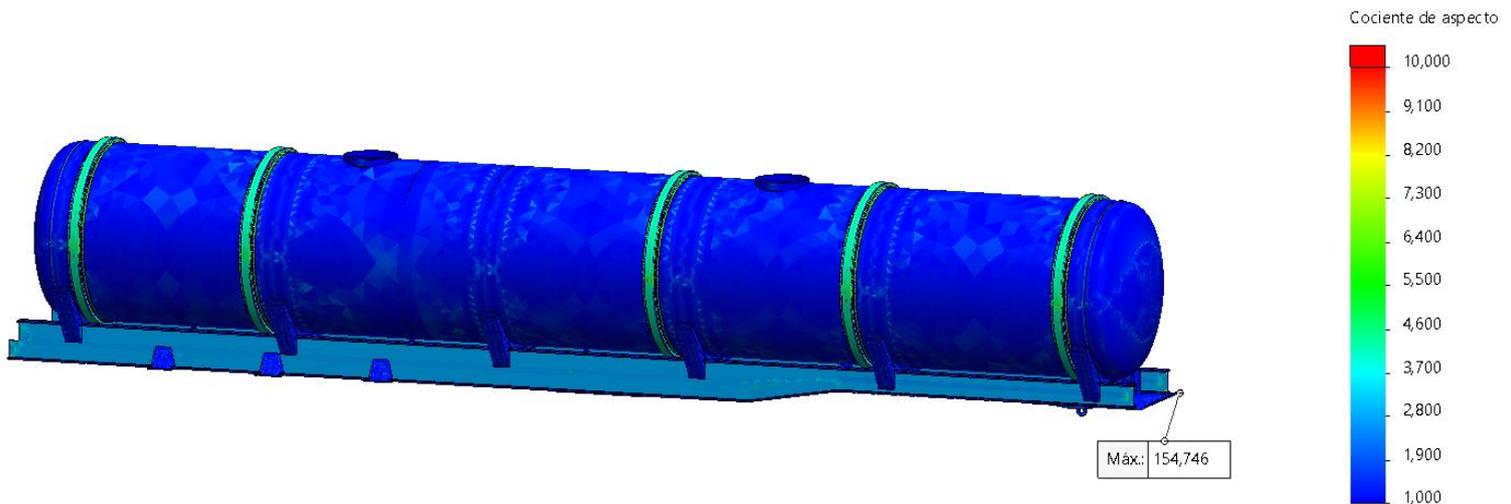


Imagen 26 – Trazado del cociente de aspecto del mallado.

5.5.4. Cargas

La normativa nacional establece que para la obtención de la LCM el semirremolque debe ser capaz de superar cargas estáticas y dinámicas manteniendo su integridad estructural. Las cargas de ensayos fueron definidas por lo establecido en el código BPVC Section XII - Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks y por el Acuerdo sobre el Transporte Internacional de Mercancía Peligrosa por Carretera – ADR. Estas se describen a continuación y se modelan en cada uno de los estudios asociados.

i. Condición de carga estática A:

Se somete el semirremolque a una carga vertical descendente igual a una vez la aceleración de la gravedad, $1g$ (carga igual al peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad), aplicada de forma uniformemente distribuida y resistida por el tren rodante y la quinta rueda. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

ii. Condición dinámica B:

Se somete el semirremolque a dos condiciones de carga:

Condición B₁: una combinación de una fuerza longitudinal de frenado igual al 0,35 del peso bruto total más una carga transversal igual al 0,20 del peso bruto total. A su vez, esta condición se subdivide en las condiciones B_{1a} y B_{1b}, siendo la B_{1a} aquella donde la fuerza de frenado se aplica sobre el tren rodante y la sujeción se encuentra sobre el plato de enganche, mientras que la condición B_{1b} es aquella donde la fuerza de frenado se aplica sobre el plato de enganche y la sujeción se encuentra en el tren rodante. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP) y el peso bruto de la cisterna exceptuando el tren rodante en su totalidad.

Condición B₂: una combinación de una fuerza longitudinal de aceleración igual al 0,35 del peso bruto total más una carga transversal igual al 0,2 del peso bruto total. La condición B₂ es aquella donde la fuerza de aceleración se aplica, en su totalidad, sobre el plato de enganche y la sujeción se encuentra en el tren rodante. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP) y el peso bruto de la cisterna exceptuando el tren rodante en su totalidad.

iii. Condición dinámica C:

Se somete el semirremolque a una carga vertical descendente igual a dos veces la aceleración de la gravedad, **2g** (carga igual a dos veces el peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad), aplicada de forma uniformemente distribuida y resistida por el tren rodante y la quinta rueda. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

iv. Condición dinámica D:

Se somete el semirremolque a dos condiciones de carga:

Condición D₁: una fuerza longitudinal de aceleración igual a una vez la aceleración de la gravedad, **1g** (carga igual al peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad). Esta fuerza se aplica, en su totalidad, sobre el plato de enganche y la sujeción se encuentra en el tren rodante. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

Condición D₂: una fuerza longitudinal de frenado igual a una vez la aceleración de la gravedad, **1g** (carga igual al peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad). Esta fuerza se aplica, en su totalidad, sobre el tren rodante y la sujeción se

encuentra en el plato de enganche. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

v. Condición dinámica E:

Se somete el semirremolque a una carga transversal al sentido de marcha igual a una vez la aceleración de la gravedad, **1g** (carga igual al peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad), aplicada de forma uniformemente distribuida y resistida por el tren rodante y la quinta rueda. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

vi. Condición estática F:

Se somete el semirremolque a una carga longitudinal igual a dos veces la aceleración de la gravedad, **2g** (carga igual a dos veces el peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad), aplicada de forma uniformemente distribuida sobre los mamparos y resistida por el tren rodante y la quinta rueda. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

vii. Condición estática G:

Se somete el semirremolque a una carga vertical ascendente igual a una vez la aceleración de la gravedad, **1g** (carga igual al peso bruto total, W_T , exceptuando el tren rodante en su totalidad), aplicada de forma uniformemente distribuida y resistida por el tren rodante y la quinta rueda. Además de las cargas anteriores, los compartimentos se consideran bajo la acción de la presión de trabajo máxima permisible (MAWP).

viii. Condición H – Presión interna en condiciones de sobrepresión:

En función de lo definido por el Department Of Transportation (DOT) en el Code of Federal Regulations (CFR), volumen 49, inciso 178.345-10 - Pressure relief, se debe ejecutar la simulación aplicando una presión manométrica interna de $0,21MPa$, considerando que, según dicho código, es la presión que cada dispositivo de alivio de presión debe ser capaz de soportar durante, al menos, 60 milisegundos bajo condiciones de presión dinámica más la presión de diseño. Ésta última, por ser una cisterna que no opera bajo presión positiva o bajo presión de vacío durante las operaciones de carga y descarga de la sustancia, no se considera en los cálculos. En otras palabras, opera bajo condiciones atmosféricas.

ix. Condición I – Presión externa:

Se somete el semirremolque a una presión externa de $0,19MPa$.

La presión externa de verificación resulta de la mínima presión externa permisible de los diferentes componentes del semirremolque. En otras palabras, se ejecutaron cálculos analíticos en función del Código ASME BPVC VIII – Div. 1 para determinar cuál es la máxima presión externa que puede aplicarse sobre la envolvente y los cabezales toriesféricos y, considerando que la menor presión resulta de los cabezales, es la que se considera para ejecutar la simulación (con el fin de obtener un diseño conservador).

5.6. Resultados

5.6.1. Condición estática A

La fuerza ejercida por la carga de ácido clorhídrico dentro de la cisterna se modela mediante un gradiente de presión hidrostática con origen en el punto más alto de la superficie de la cisterna y creciente con dirección Y sentido -Y, como se muestra en *Imagen 27*. En simultaneo se somete al semirremolque a la acción de gravedad y a una presión interna cuyo valor es $0,04MPa$ (Presión de servicio, resultante de la presión de vapor de la sustancia transportada).

La ecuación que gobierna al gradiente de presión viene dada por la conocida expresión:

$$P = \rho \times g \times h$$

Donde:

- ⇒ P es la presión hidrostática. [Pa]
- ⇒ ρ es la densidad de la sustancia. [kg/m^3]
- ⇒ g es la gravedad. [$9,81m/s^2$]
- ⇒ h es la altura de la cisterna. [m]

Reemplazando los valores obtenidos la ecuación queda:

$$P = 1.184 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times h$$

Esta será la ecuación que gobierna casi la totalidad de los ensayos a realizar.

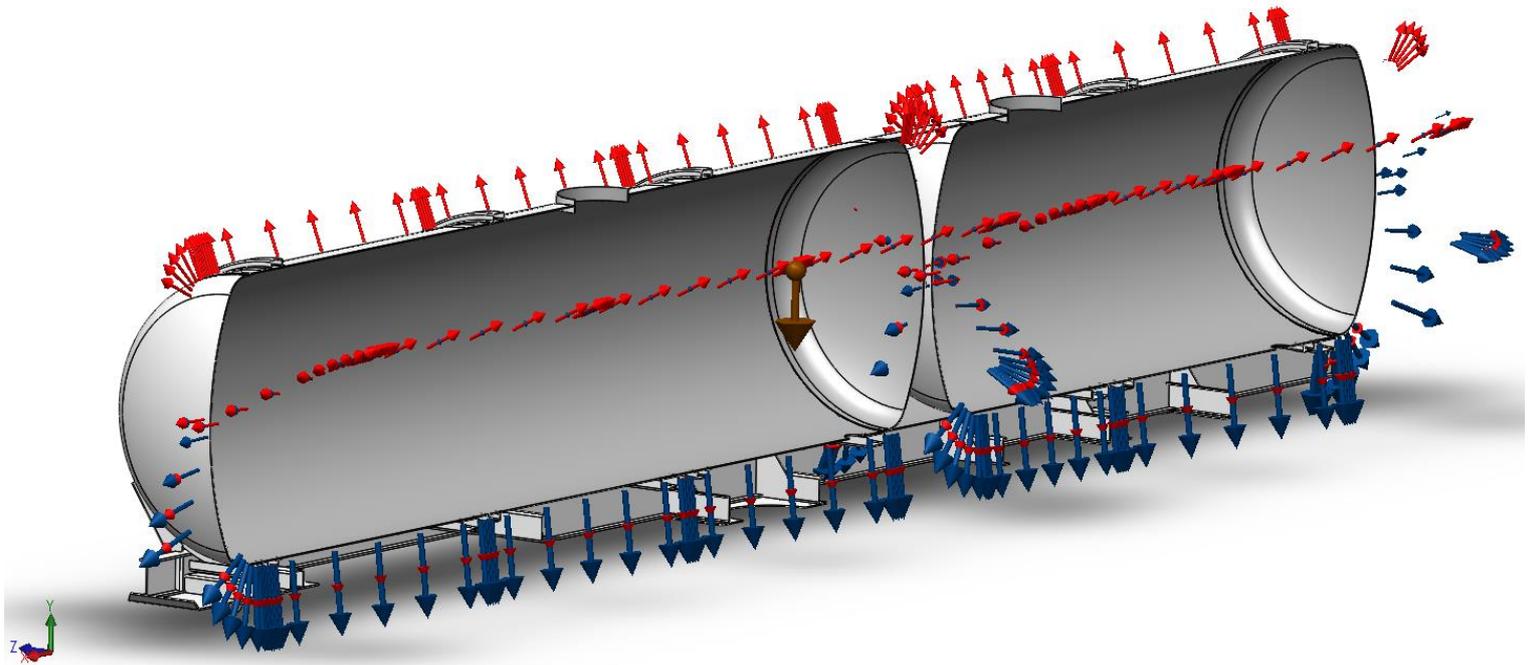


Imagen 27 – Cargas -> Condición estática A -> Vista en corte.

El campo de tensiones obtenido como resultado de las solicitaciones establecidas se puede observar en **Imagen 28**.

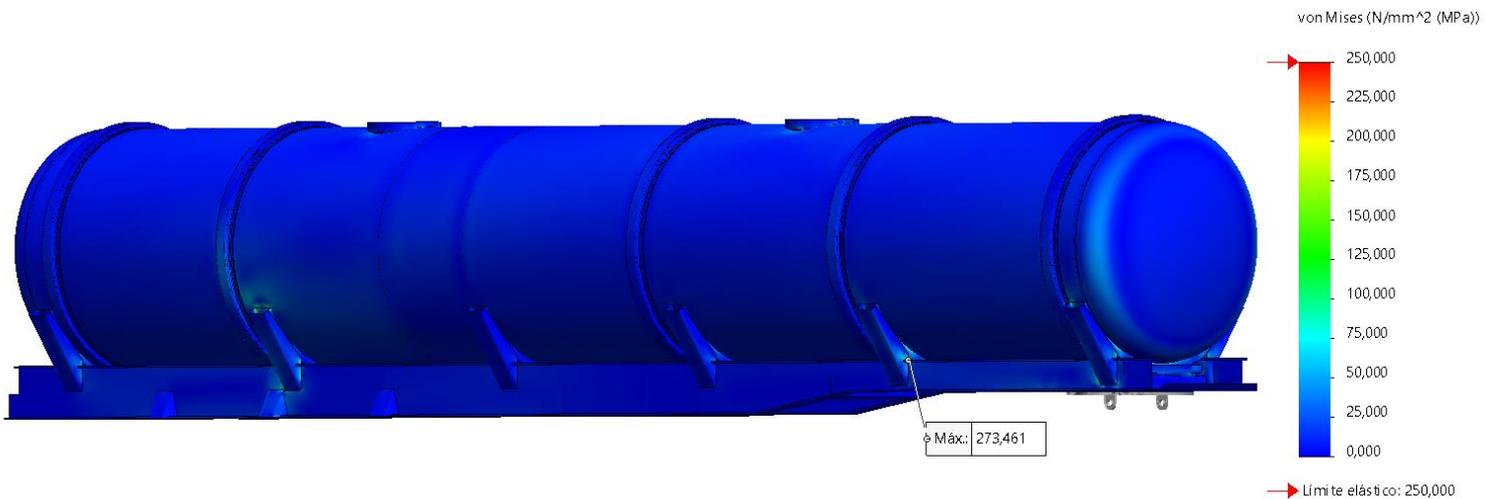


Imagen 28 – Campo de tensiones -> Condición estática A.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se traza una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa (Tensión permisible determinada en sección 5.5.1) como se muestra en **Imagen 29**.

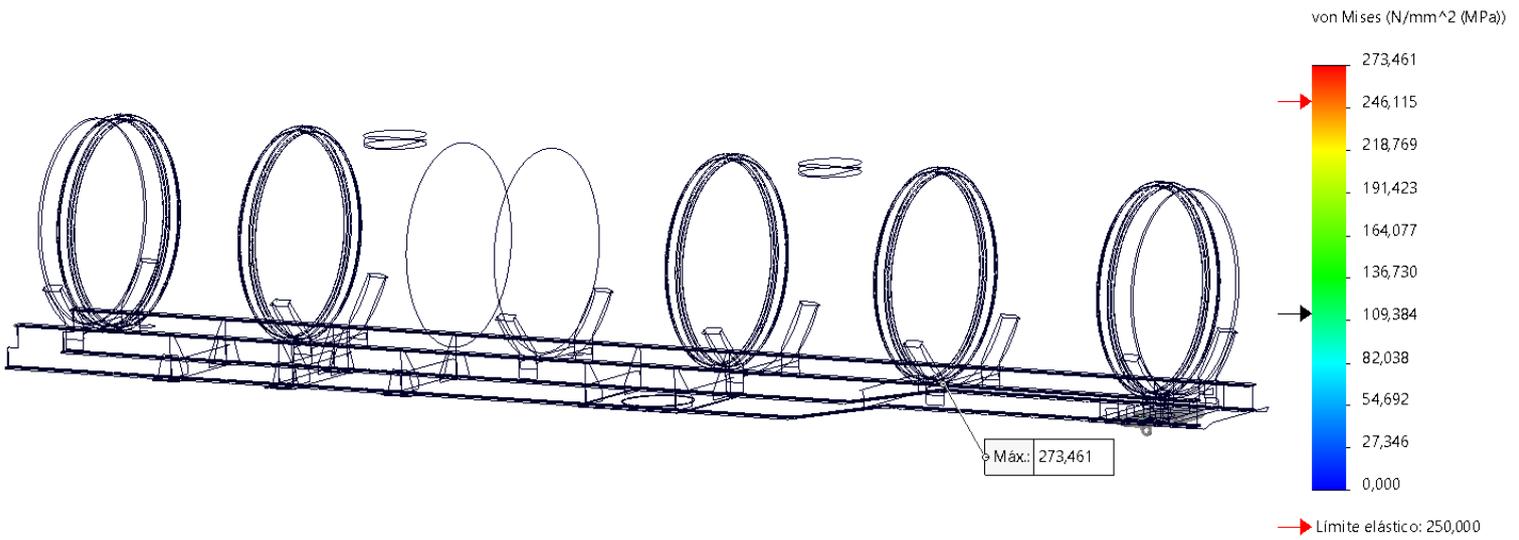


Imagen 29 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática A.

Se comprende que las tensiones generadas están por debajo de 114MPa, pero existe una concentración de tensiones en los brazos de la cuna de apoyo de la cisterna, como se ve en *Imagen 30*, propio de la geometría del corte del mismo.

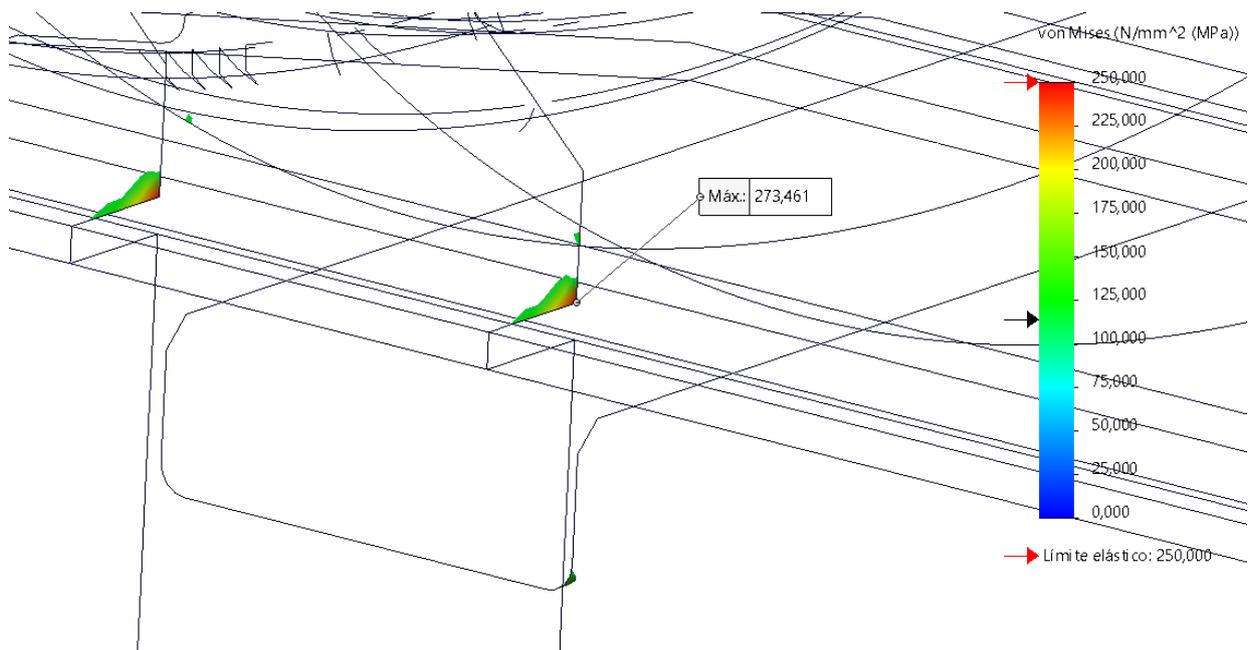


Imagen 30 – Concentrador de tensiones -> Condición estática A.

El campo de desplazamientos del semirremolque se muestra en **Imagen 31**. En ella los desplazamientos se encuentran mayorados por un factor de 10 veces y se superpone con el modelo sin deformación para comprender la naturaleza de los desplazamientos.

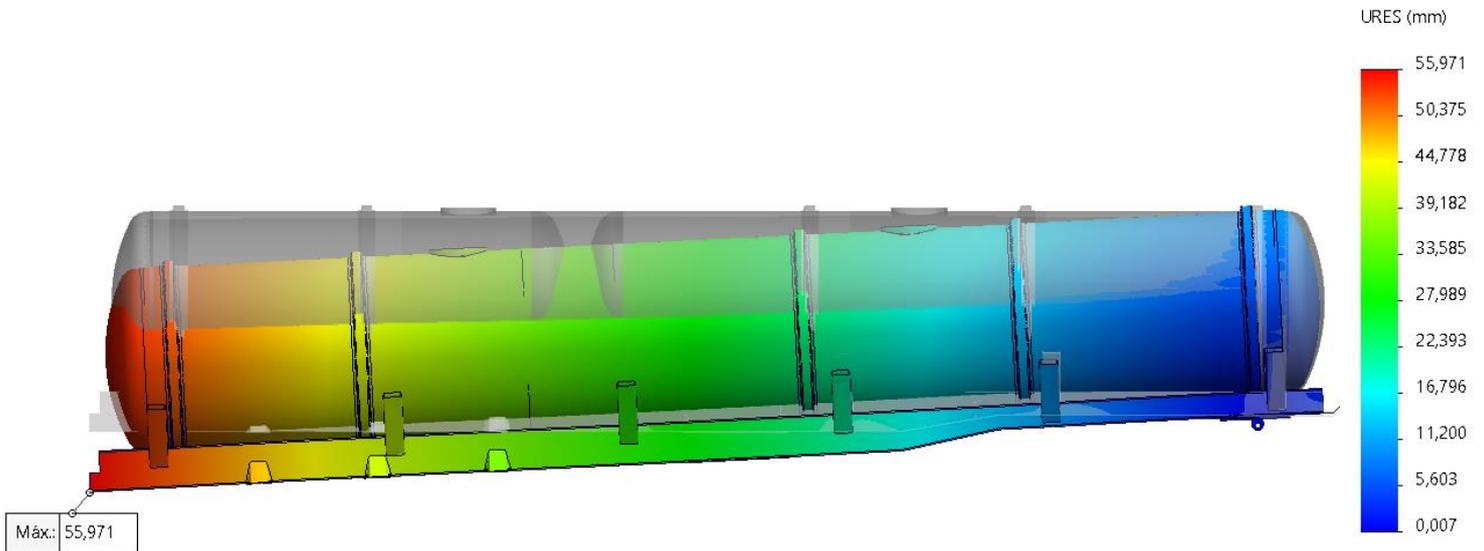


Imagen 31 – Campo de desplazamientos -> Condición estática A.

Por último, se obtiene el trazado del factor de seguridad de la estructura como se muestra en **Imagen 32**. Cabe resaltar que se fija como máximo valor del factor de seguridad a mostrar de 10 (aplica para las demás condiciones de carga). Aquí interesa encontrar las zonas donde el factor de seguridad se encuentra por debajo o cercano de la unidad.

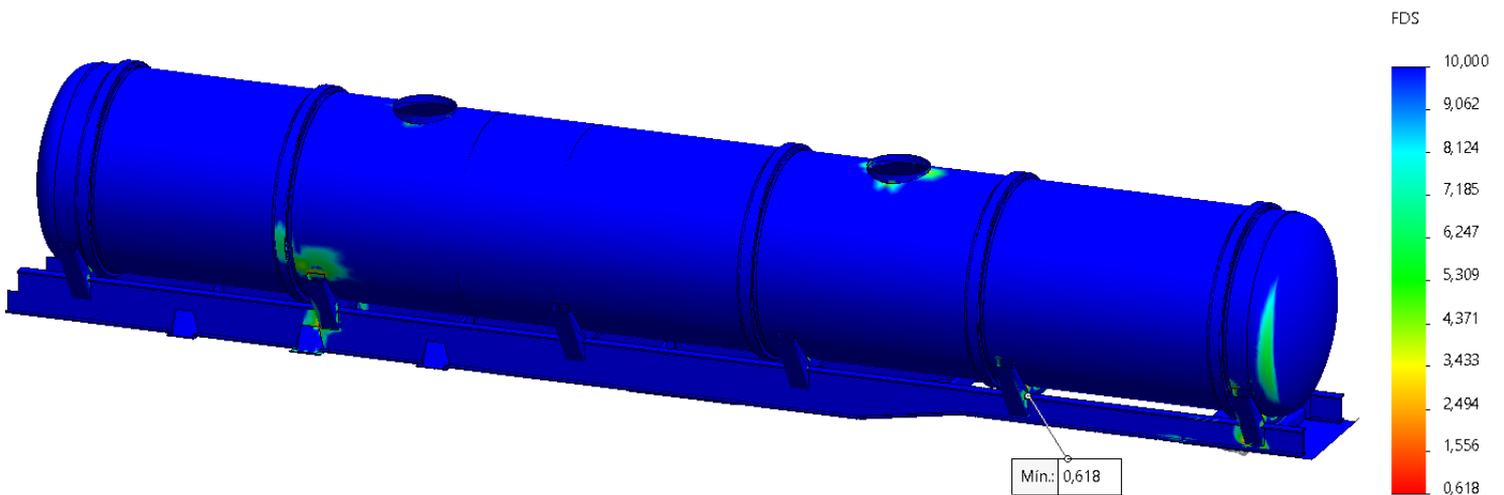


Imagen 32 – Trazado del factor de seguridad -> Condición estática A.

5.6.2. Condición dinámica B

La condición dinámica B consta de tres ítems:

5.6.2.1. Condición dinámica B_{1a}, frenado

Además de trabajar bajo la acción del peso de la sustancia, la gravedad y la presión de servicio, el semirremolque debe ser capaz de admitir una carga de frenado en dirección de circulación, aplicada en el tren rodante, cuya magnitud será el 35% de la carga que toma cada uno de los ejes. Esta carga es tratada como una “carga remota” aplicada en el centro de la masa de cada uno de los neumáticos (en este caso llamamos neumático a las duales). Además, el semirremolque se somete a una carga transversal a la dirección de circulación cuya magnitud es 20% del peso total de la sustancia transportada.

En *Imagen 33* se muestra el conjunto de cargas descripto. Con color rosa se modelan las cargas remotas que simulan la carga de frenado como producto de la fricción de los neumáticos con la carretera.

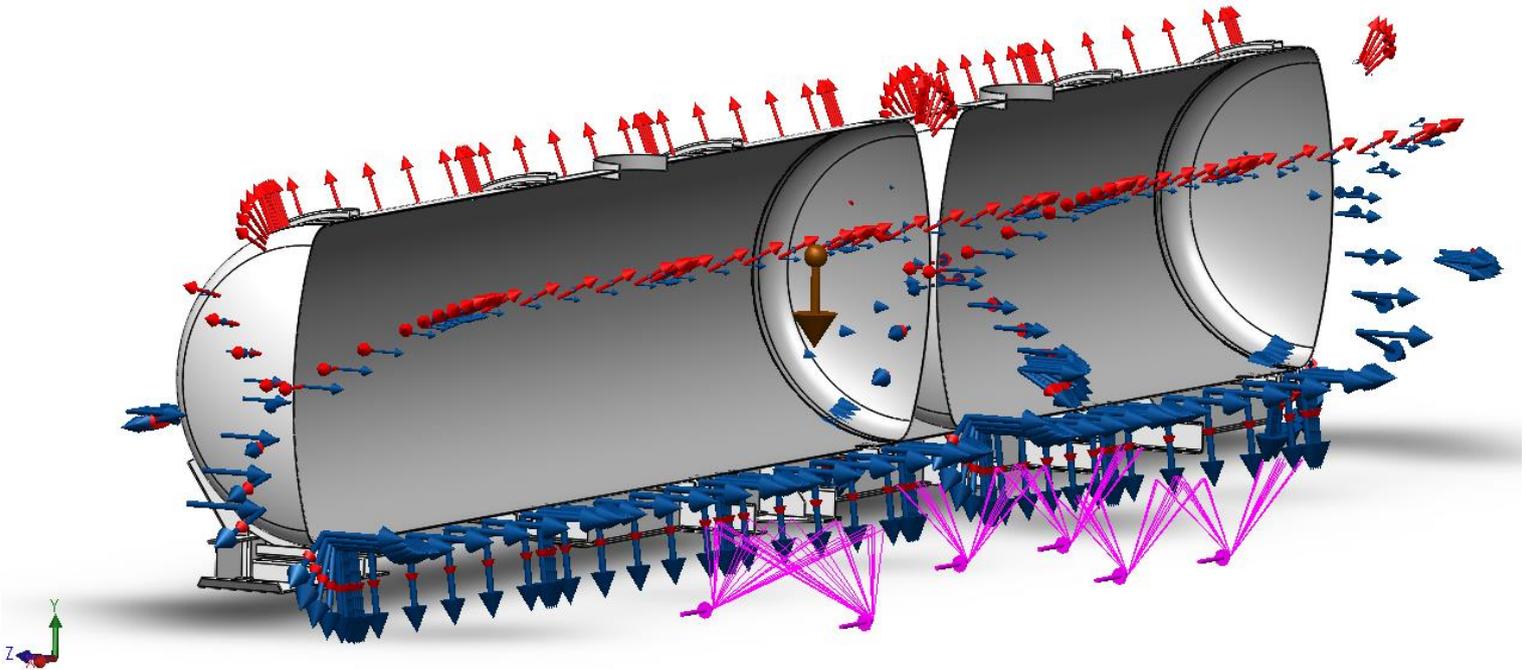


Imagen 33 – Cargas -> Condición dinámica B_{1a} -> Vista en corte.

El campo de tensiones producto del escenario de cargas establecido se muestra en **Imagen 34**.

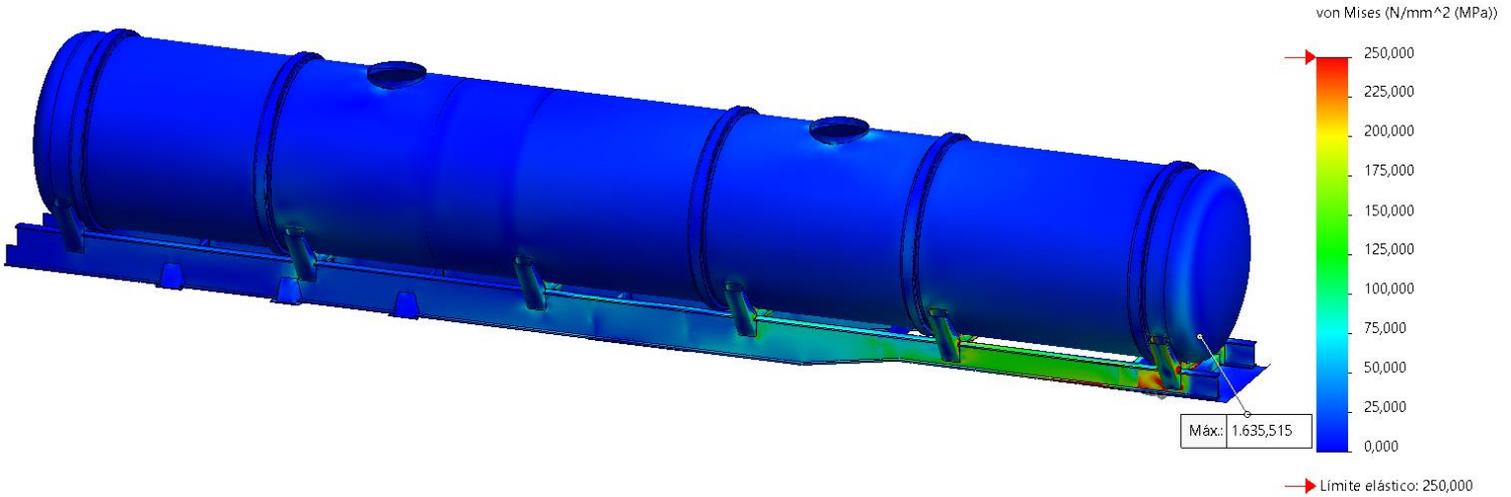


Imagen 34 – Campo de tensiones -> Condición dinámica B_{1a}.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se traza una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en **Imagen 35**.

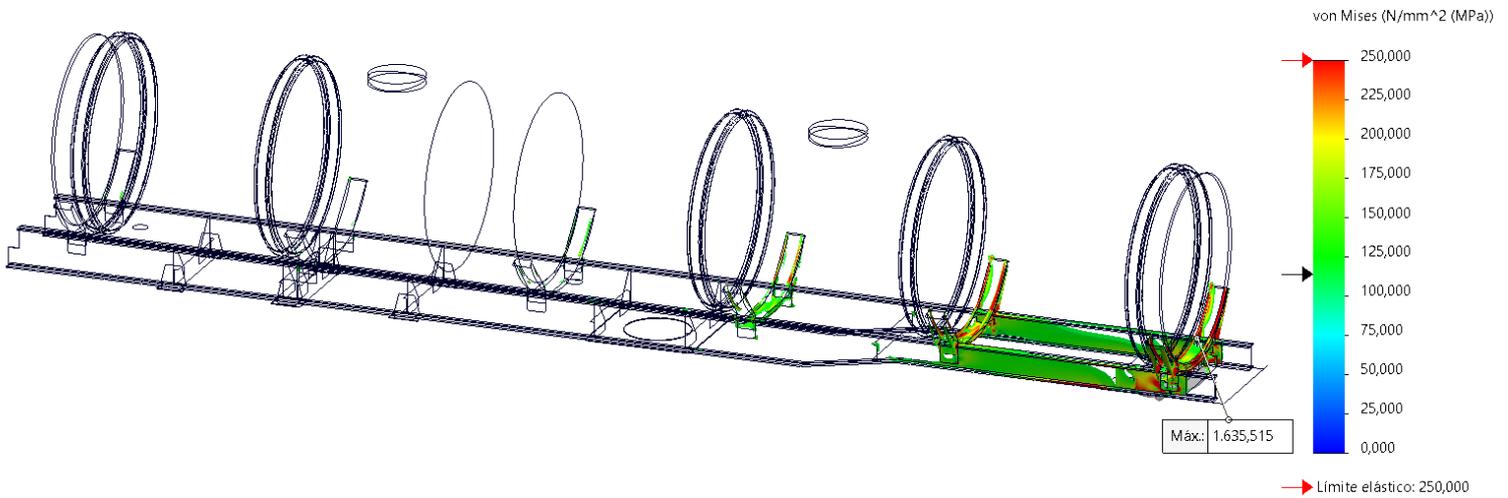


Imagen 35 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B_{1a}.

En *Imagen 36* se amplía la zona donde las tensiones superan la admisible.

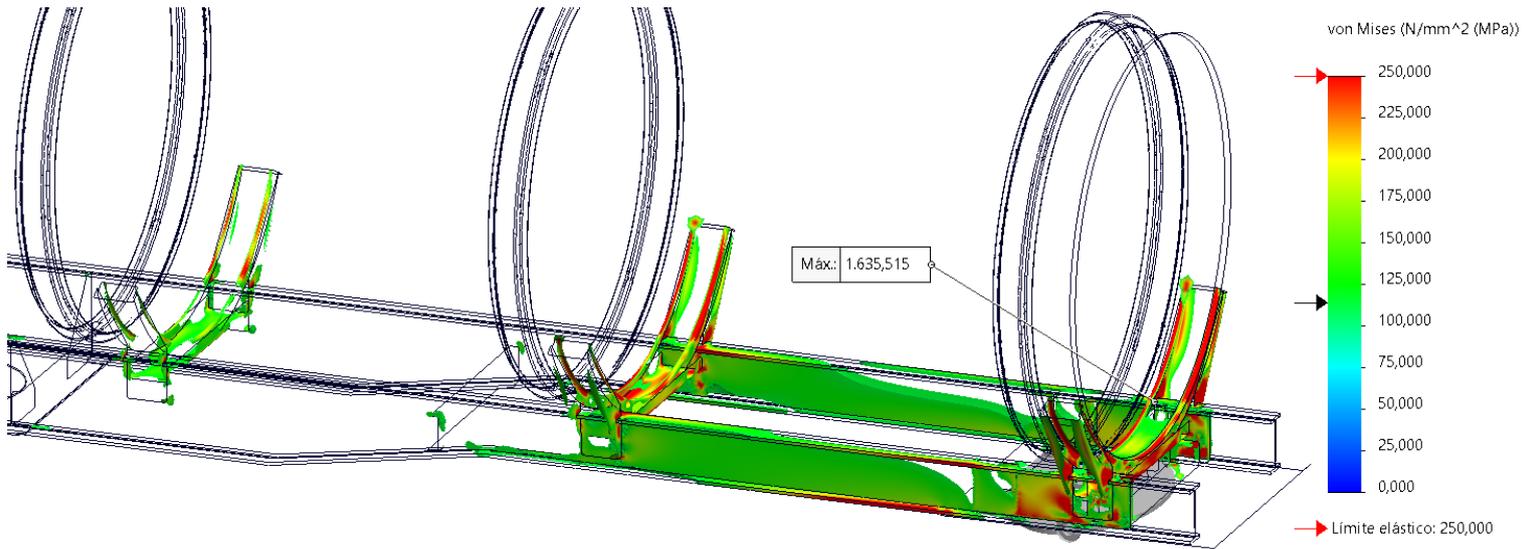


Imagen 36 – Concentración de tensiones -> Condición dinámica B_{1a} .

En *Imagen 37, 38* y *39* se intenta mostrar el campo de desplazamientos según distintas vistas. Estos desplazamientos se encuentran mayorados por un factor de 10 veces.

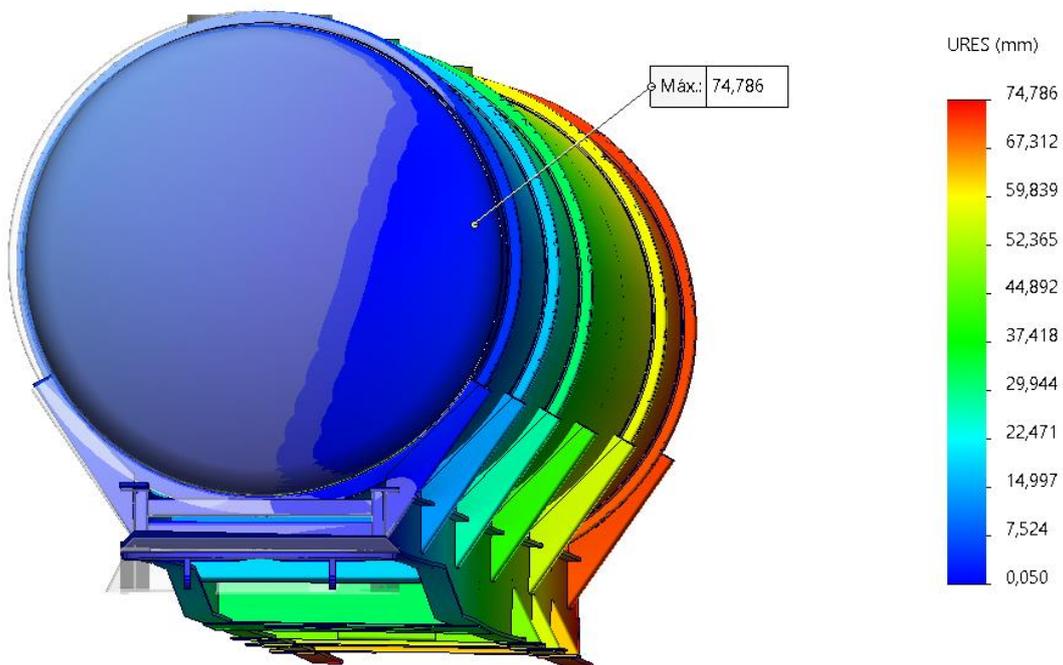


Imagen 37 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B_{1a} -> Vista frontal.

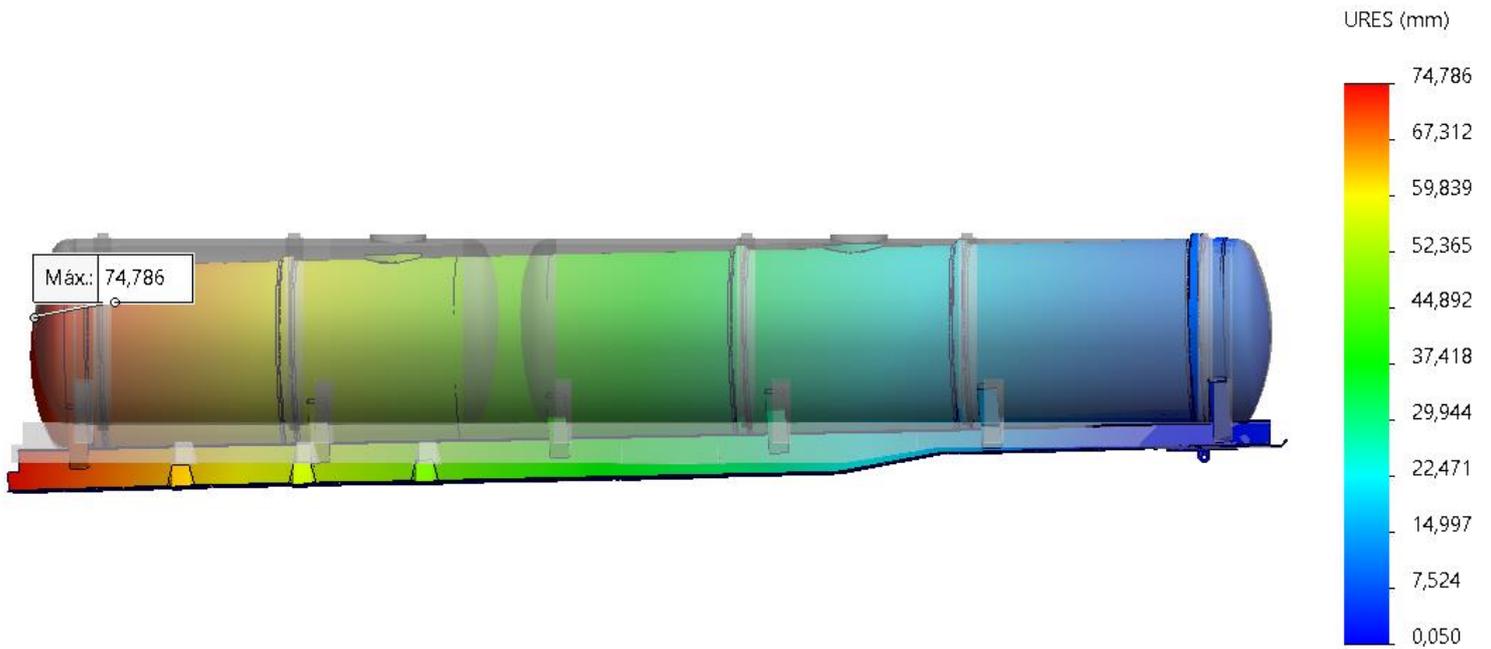


Imagen 38 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B1a -> Vista lateral.

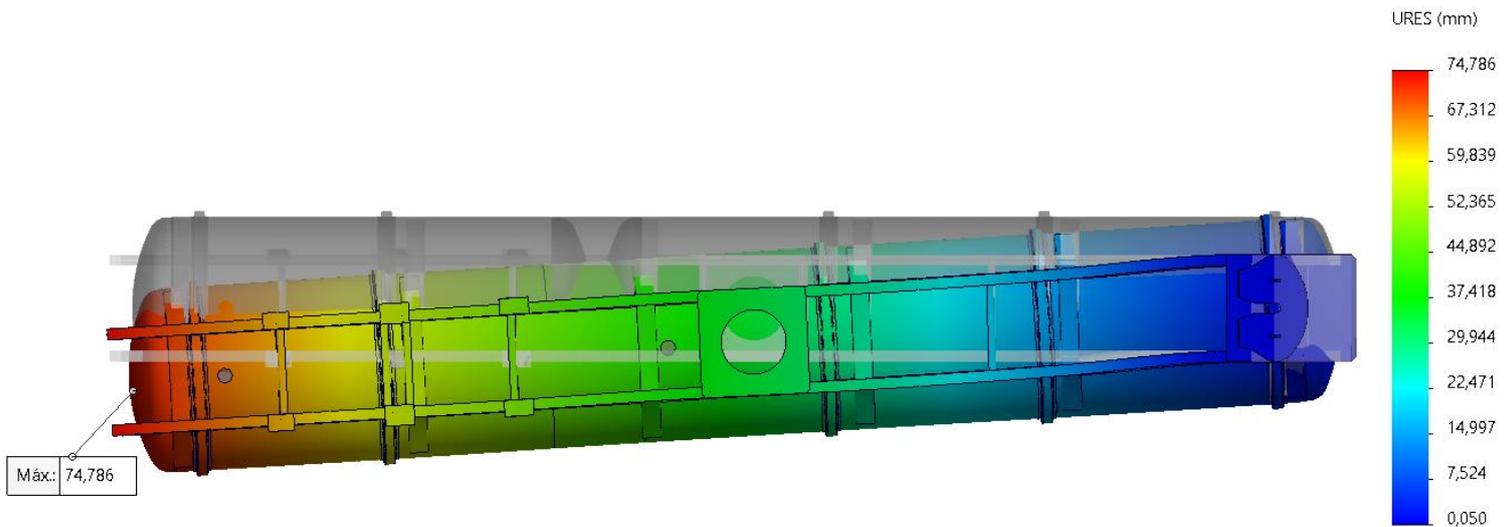


Imagen 39 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B1a -> Vista inferior.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 40*.

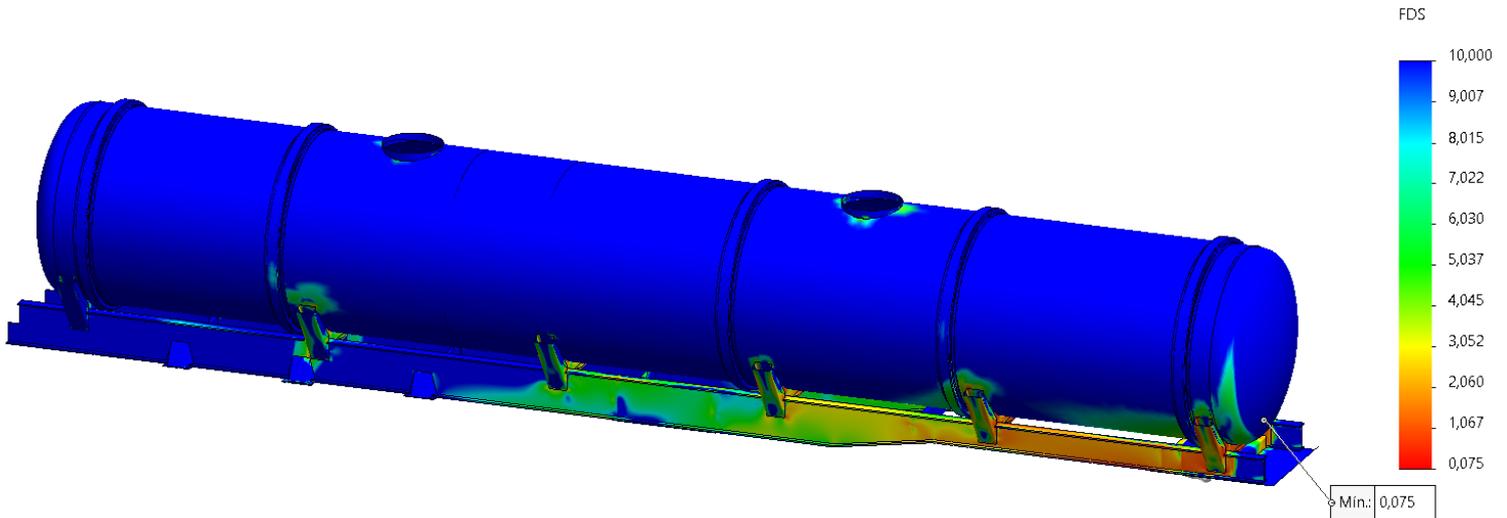


Imagen 40 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B_{1a}.

5.6.2.2. Condición dinámica B_{1b} frenado

Además de trabajar bajo la acción del peso de la sustancia, la gravedad y la presión de servicio, el semirremolque debe ser capaz de admitir una carga de frenado en dirección pero sentido contrario al de circulación, aplicada en el plato de enganche o quinta rueda, cuya magnitud será el 35% de la carga tomada por dicha vinculación. Además, el semirremolque se somete a una carga transversal a la dirección de circulación cuya magnitud es 20% del peso total de la sustancia transportada. Este conjunto de cargas se muestra en *Imagen 41*.

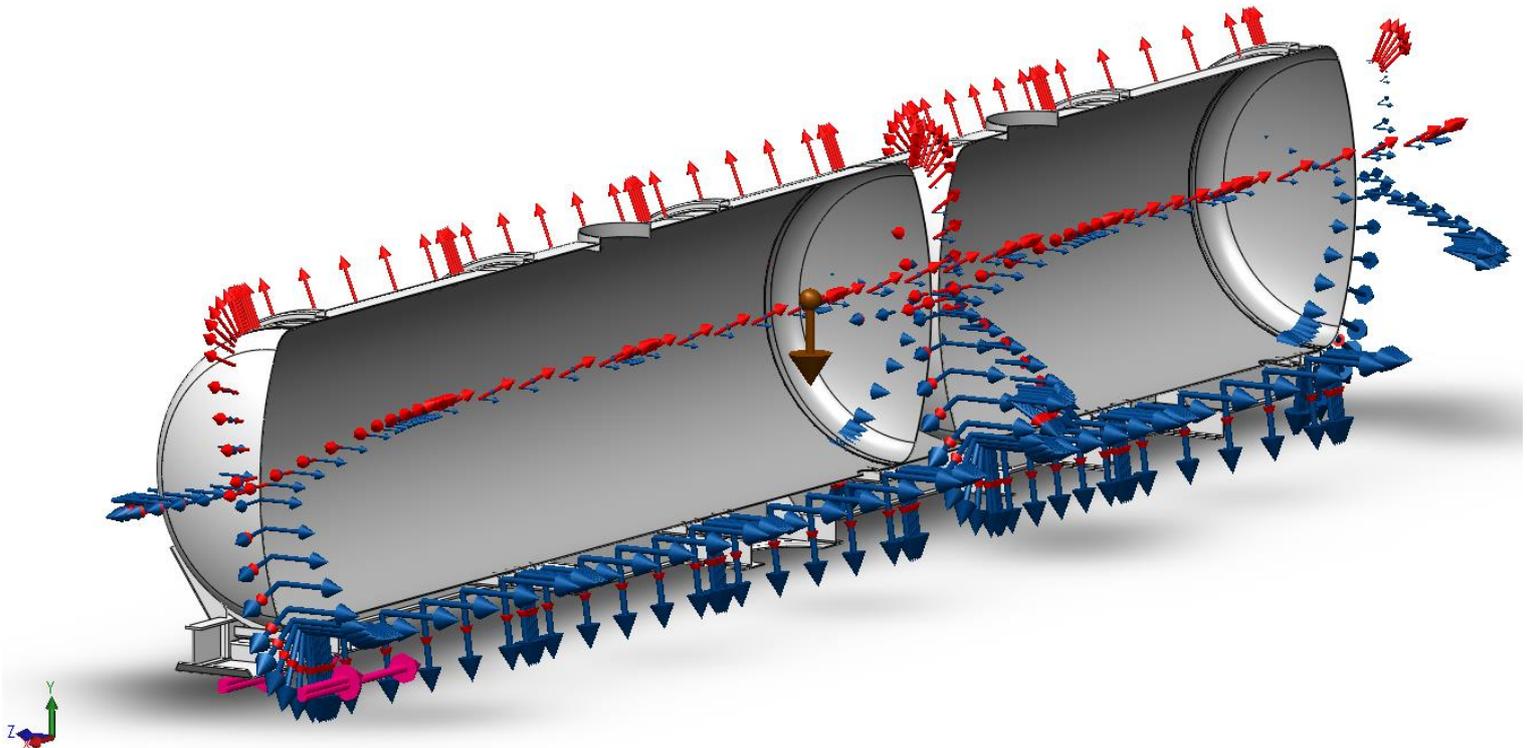


Imagen 41 – Cargas -> Condición dinámica B_{1b} -> Vista en corte.

El campo de tensiones debido a los esfuerzos generados por el escenario de cargas planteadas se muestra en **Imagen 42**.

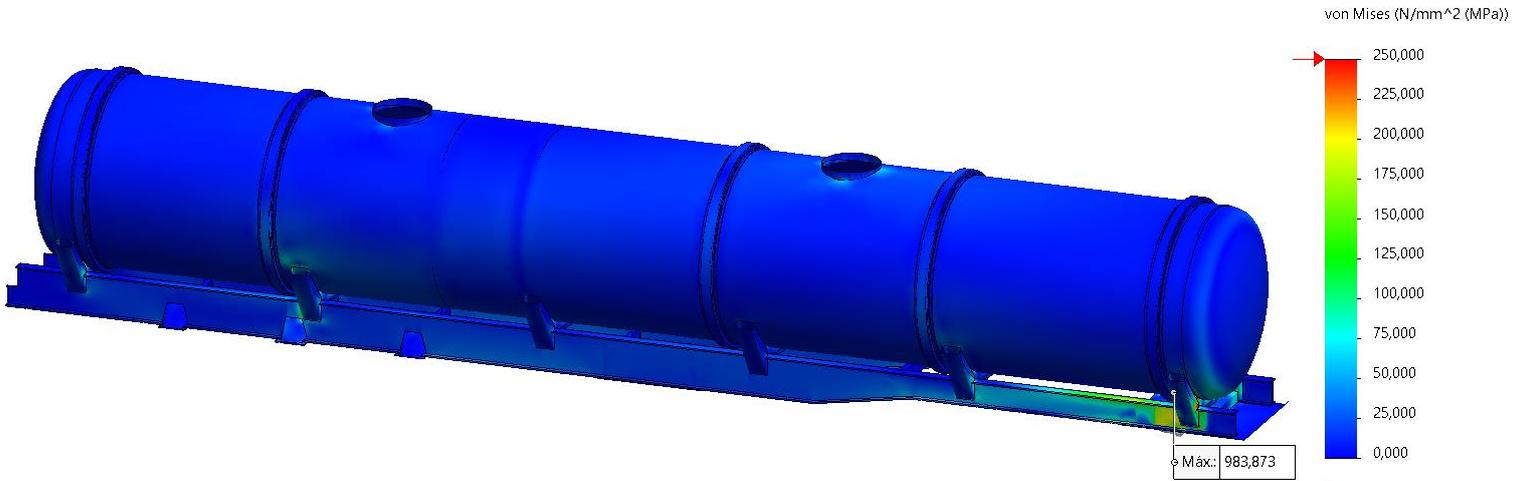


Imagen 42 – Campo de tensiones -> Condición dinámica B_{1b}.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se traza una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en **Imagen 43**.

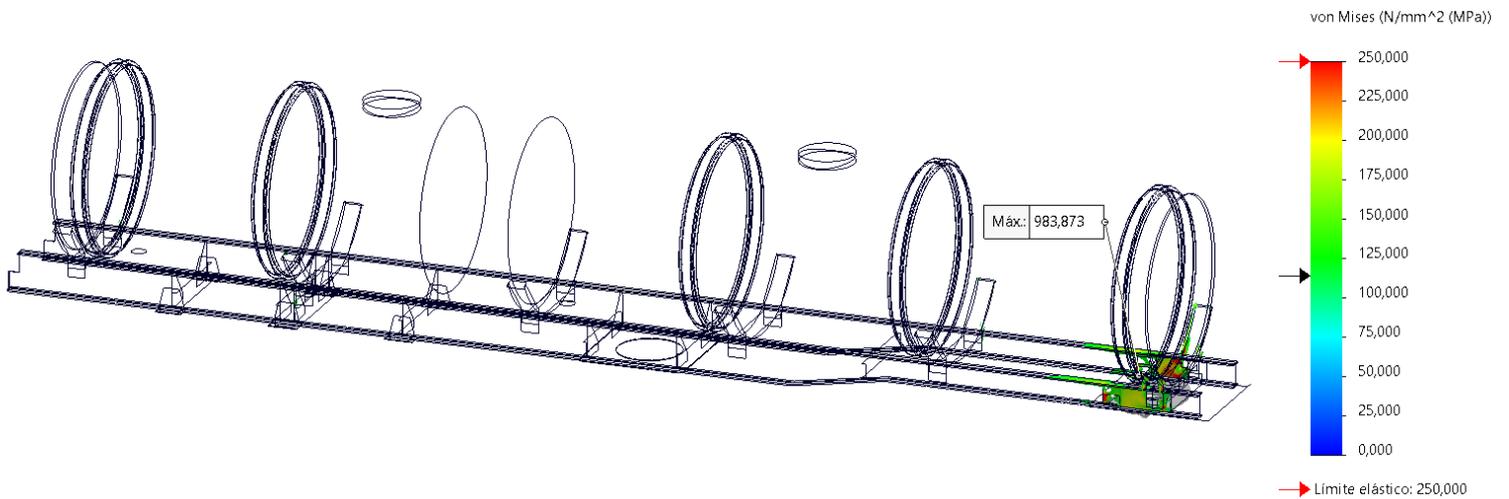


Imagen 43 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B_{1b}.

En *Imagen 44* se amplía la zona donde las tensiones superan la admisible.

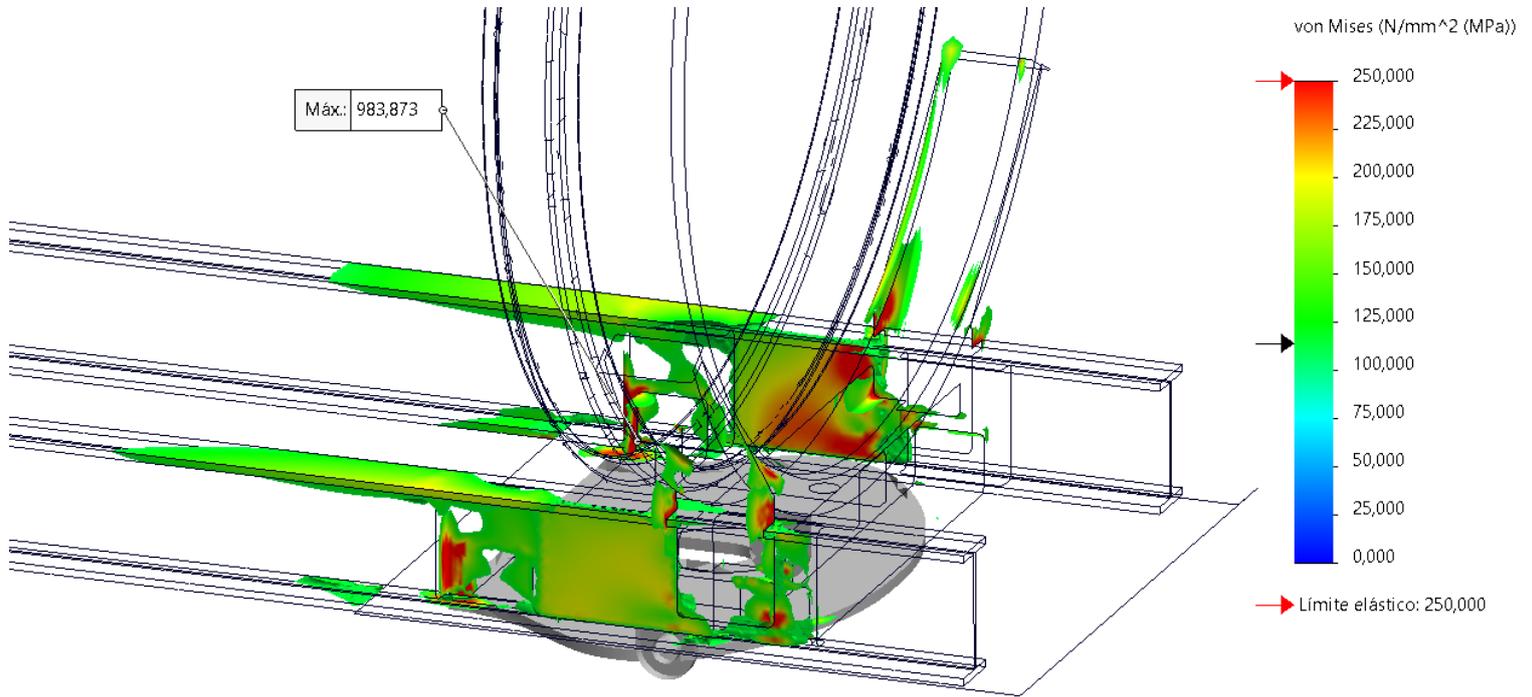


Imagen 44 – Concentración de tensiones -> Condición dinámica B_{1b}.

El campo de desplazamientos producidos por las solicitaciones propuestas se muestra en *Imagen 45 y 46*.

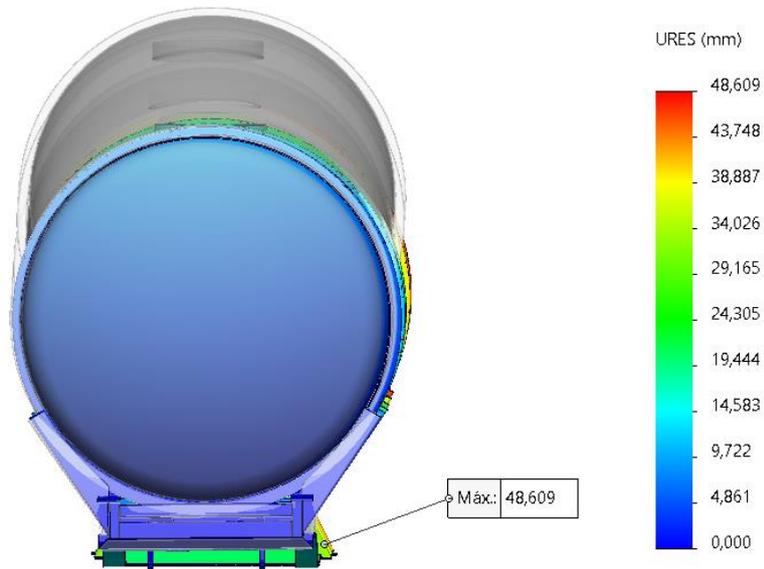


Imagen 45 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B_{1b} -> Vista frontal.

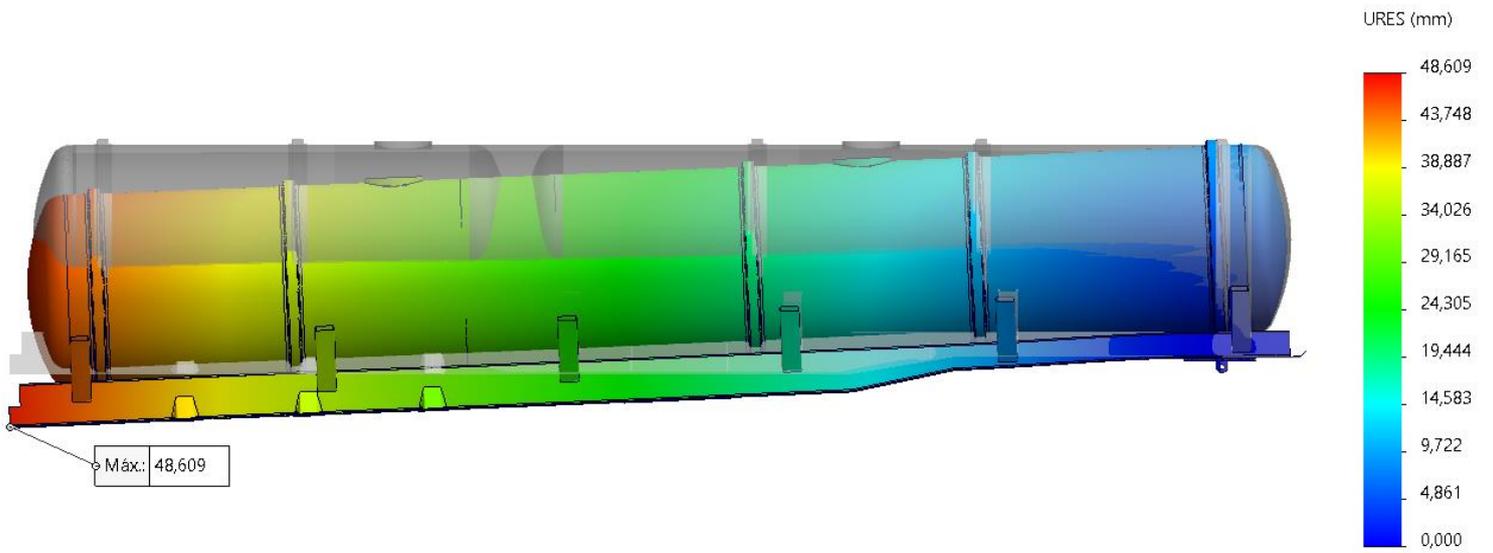


Imagen 46 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B1b -> Vista lateral.

El trazado del factor de seguridad inherente a esta condición se muestra en **Imagen 47**.

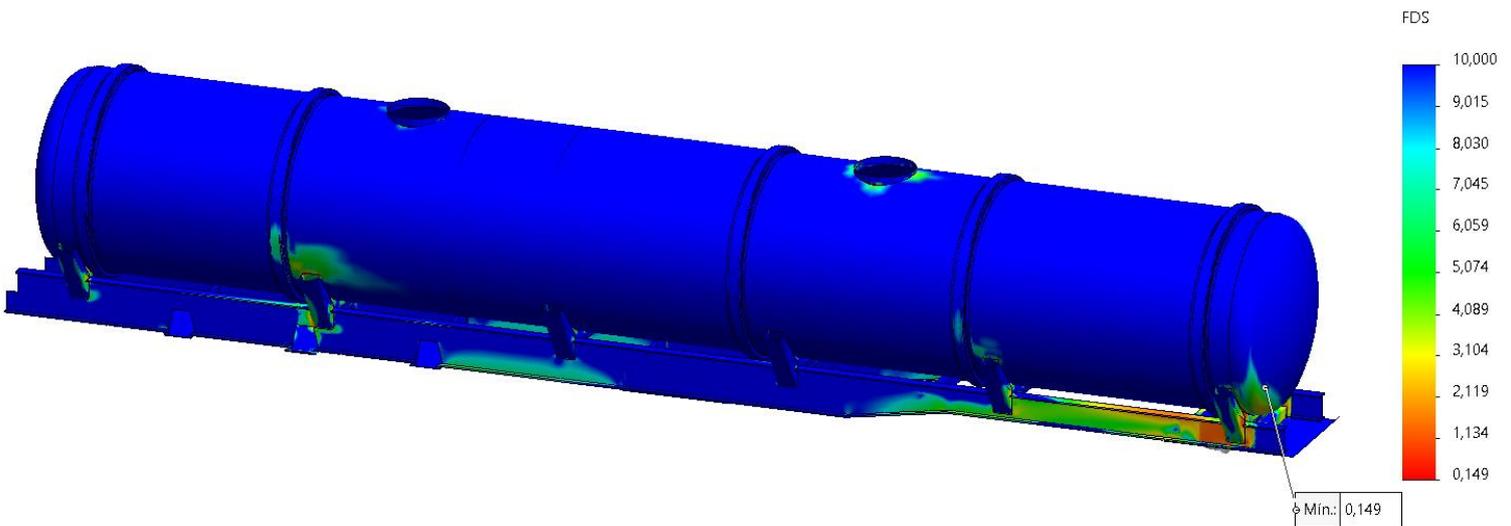


Imagen 47 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B1b.

5.6.3. Condición dinámica B_2 de aceleración

Se establece que, además de la carga debida al peso de la sustancia transportada, la presión de servicio y la gravedad, el semirremolque debe someterse a una carga longitudinal con sentido de circulación del mismo, aplicada en el plato de enganche cuyo valor debe ser el 35% de la carga reactiva en dicha vinculación, calculada en la sección 5.2 y 20% del peso de la sustancia transportada en dirección transversal a la dirección de circulación, como se muestra en **Imagen 48**.

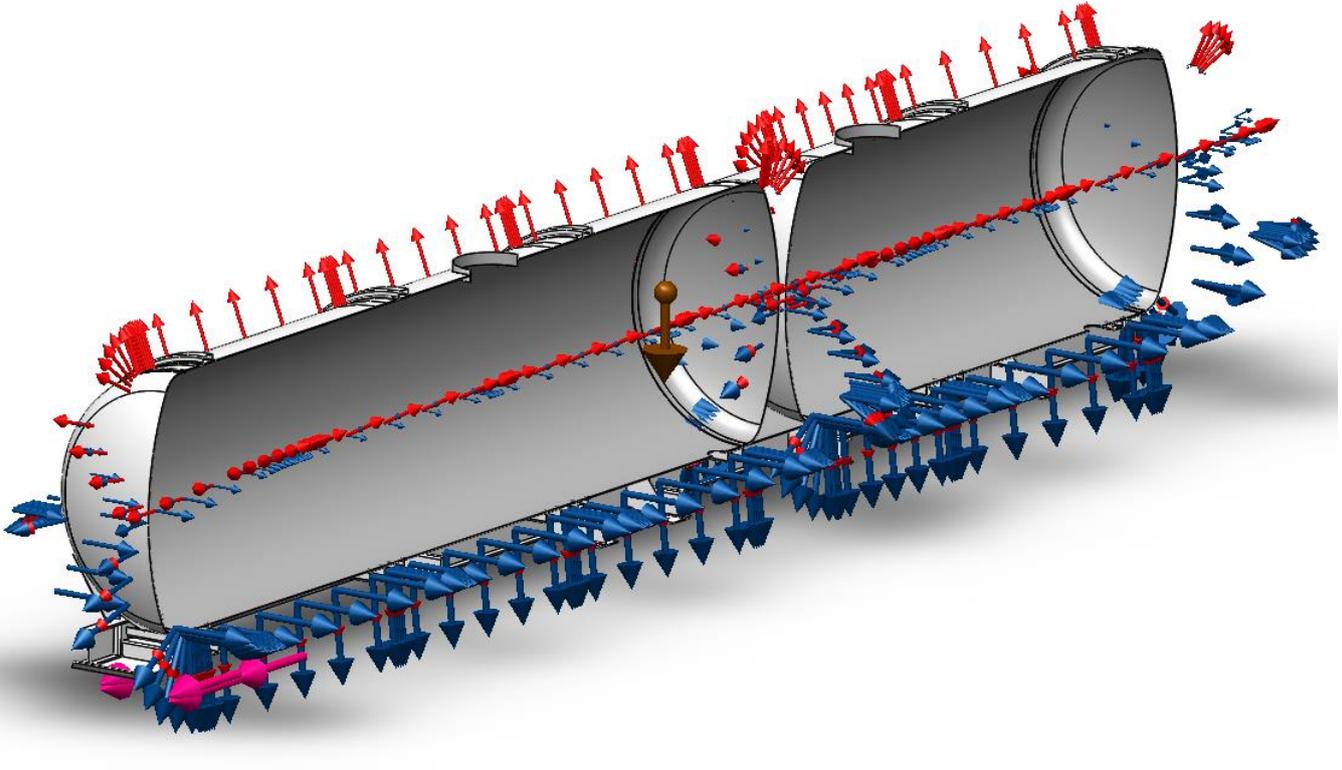


Imagen 48 – Carga -> Condición dinámica B_2 -> Vista en corte.

El campo de tensiones obtenidos para el escenario de cargas planteadas se muestra en **Imagen 49**.

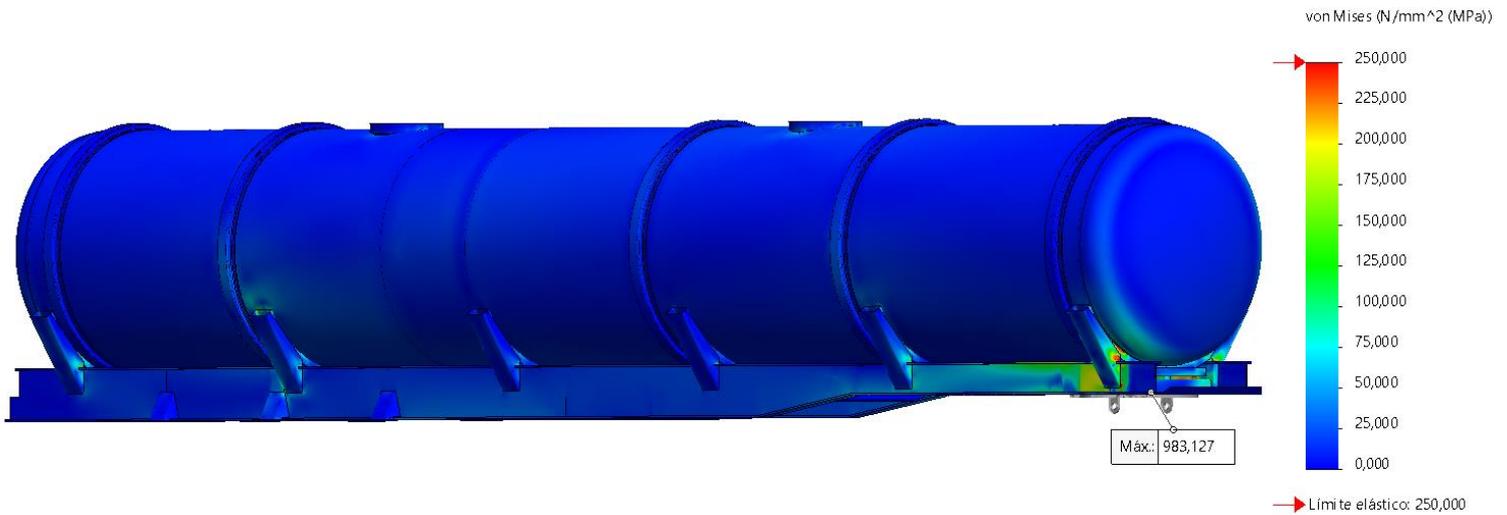


Imagen 49 – Campo de tensiones -> Condición dinámica B₂.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se traza una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en **Imagen 50**.

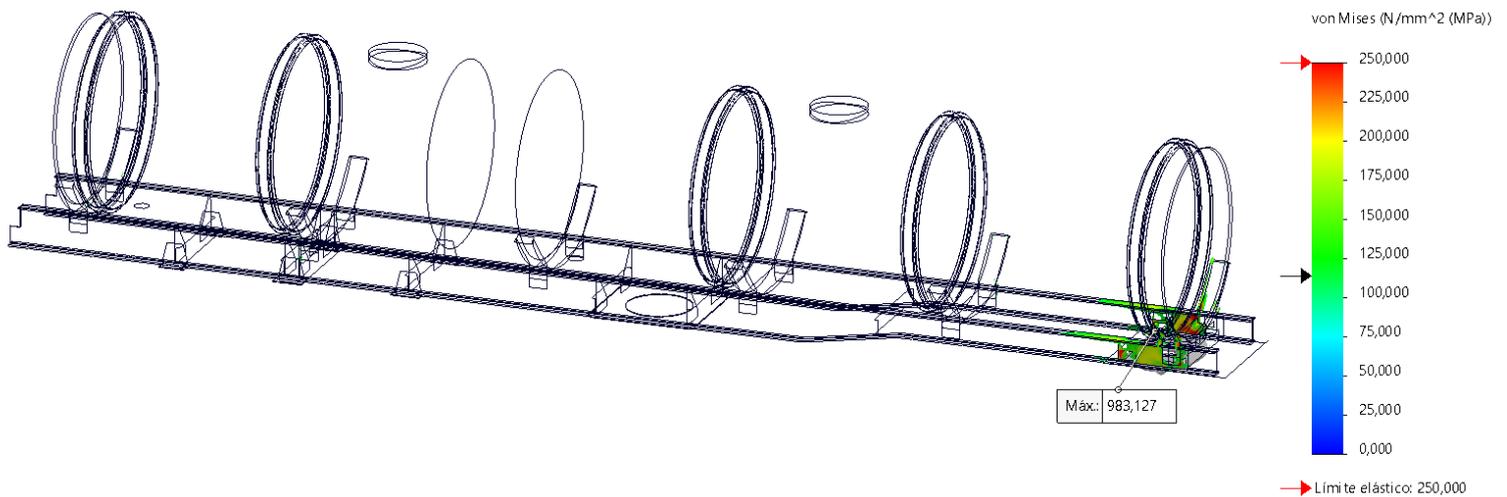


Imagen 50 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica B₂.

En *Imagen 51* se amplía la zona donde las tensiones superan la admisible.

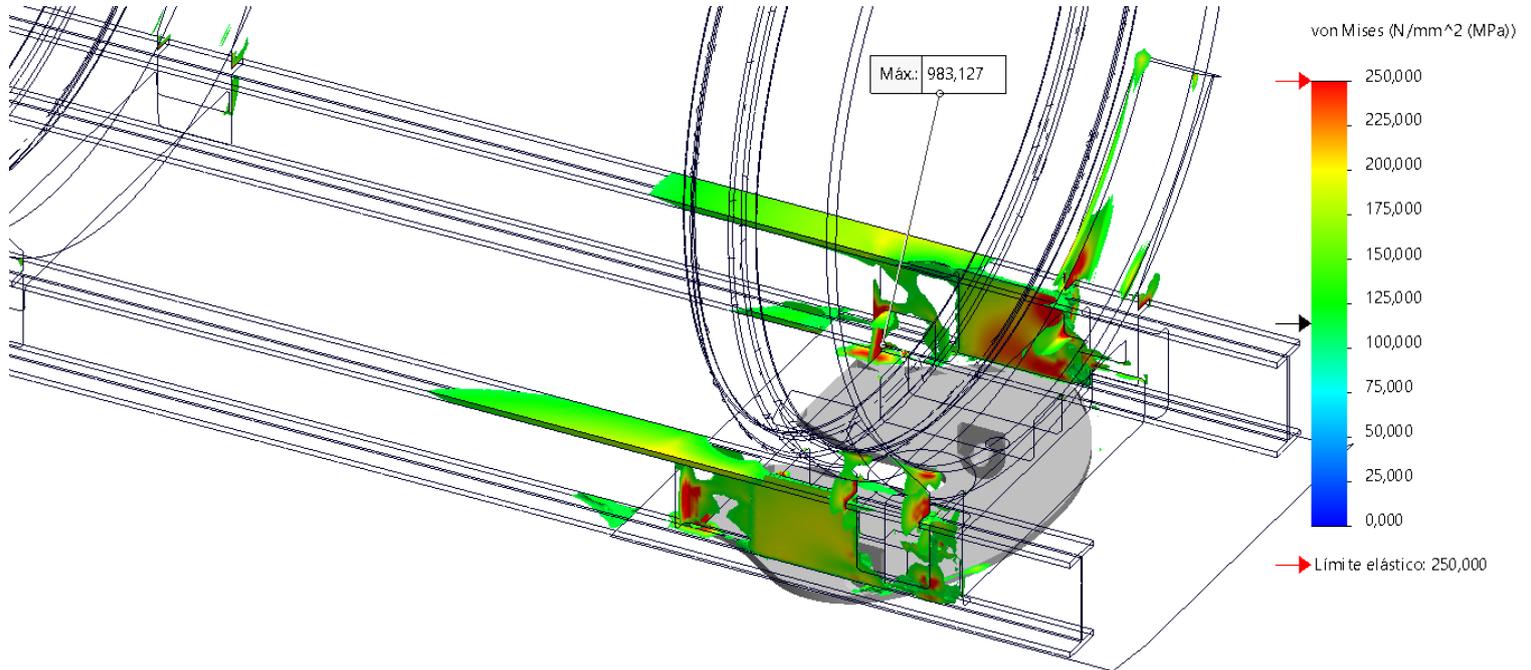


Imagen 51 – Concentración de tensiones -> Condición dinámica B₂.

El campo de desplazamientos generado por las solicitaciones en cuestión se muestra en *Imagen 52, 53 y 54*.

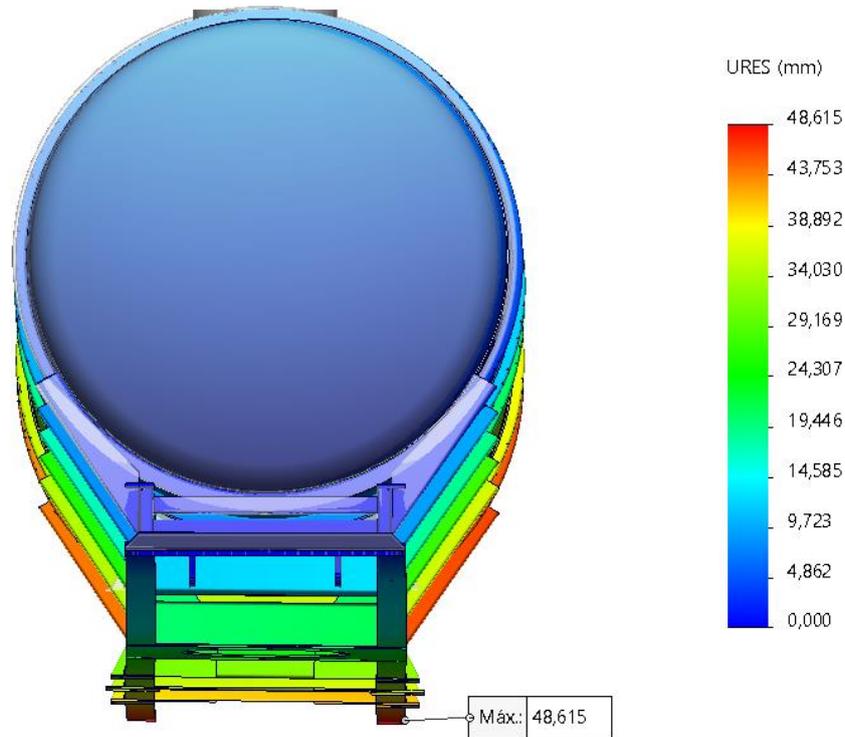


Imagen 52 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B₂ -> Vista frontal.

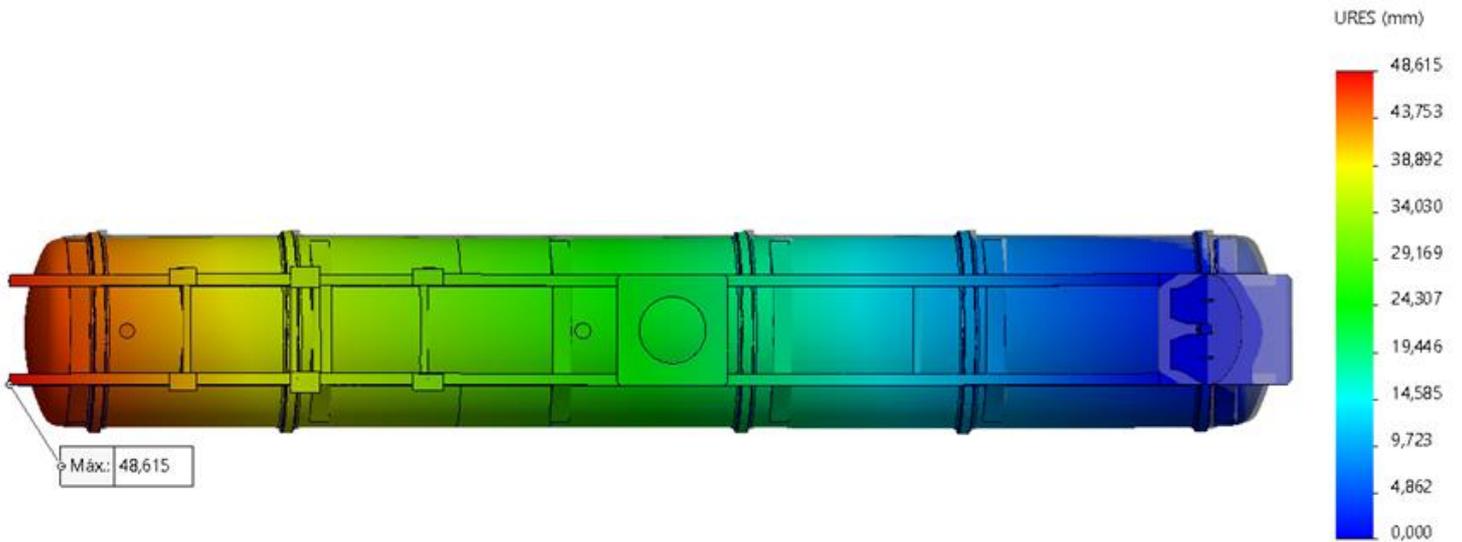


Imagen 53 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B₂ -> Vista inferior.

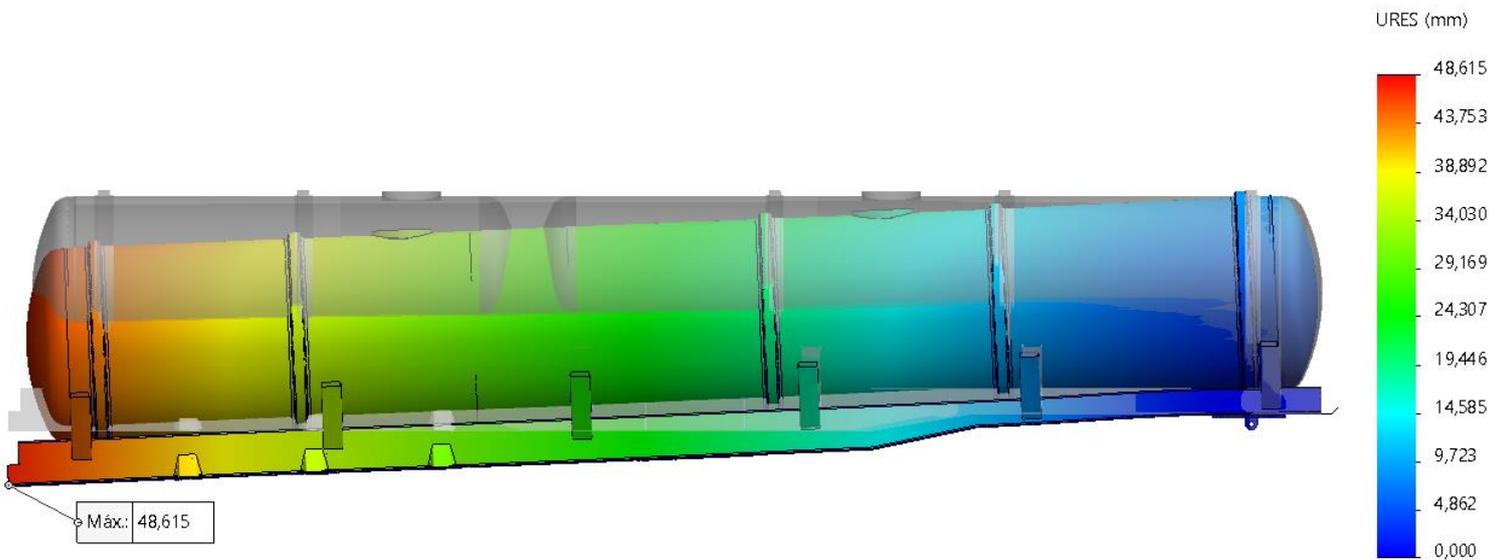


Imagen 54 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica B₂ -> Vista inferior.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 55*.

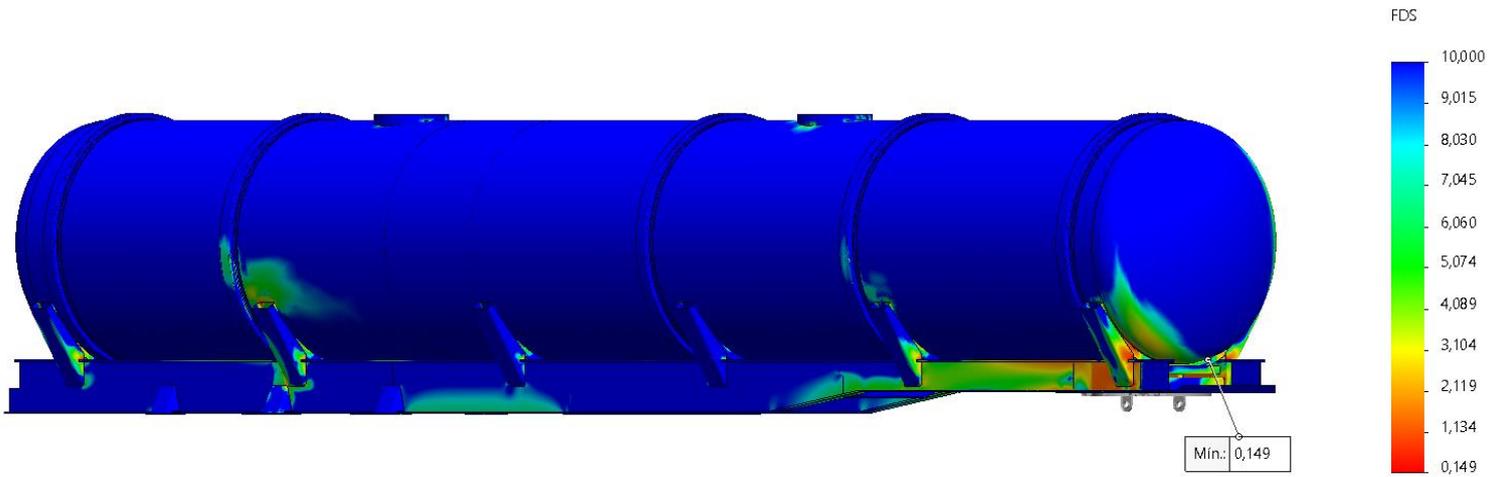


Imagen 55 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica B2.

5.6.4. Condición dinámica C

Las cargas propias de la condición C son aplicadas de la misma forma que se aplicaron en la condición estática A, con la salvedad que la gravedad se encuentra mayorada por un factor de 2 para contemplar una carga dinámica. La ecuación que rige el gradiente de presión queda de la siguiente forma:

$$P = \rho \times (2 \times g) \times h$$

El campo de tensiones obtenido por el escenario de cargas propuesto se muestra en *Imagen 56*.

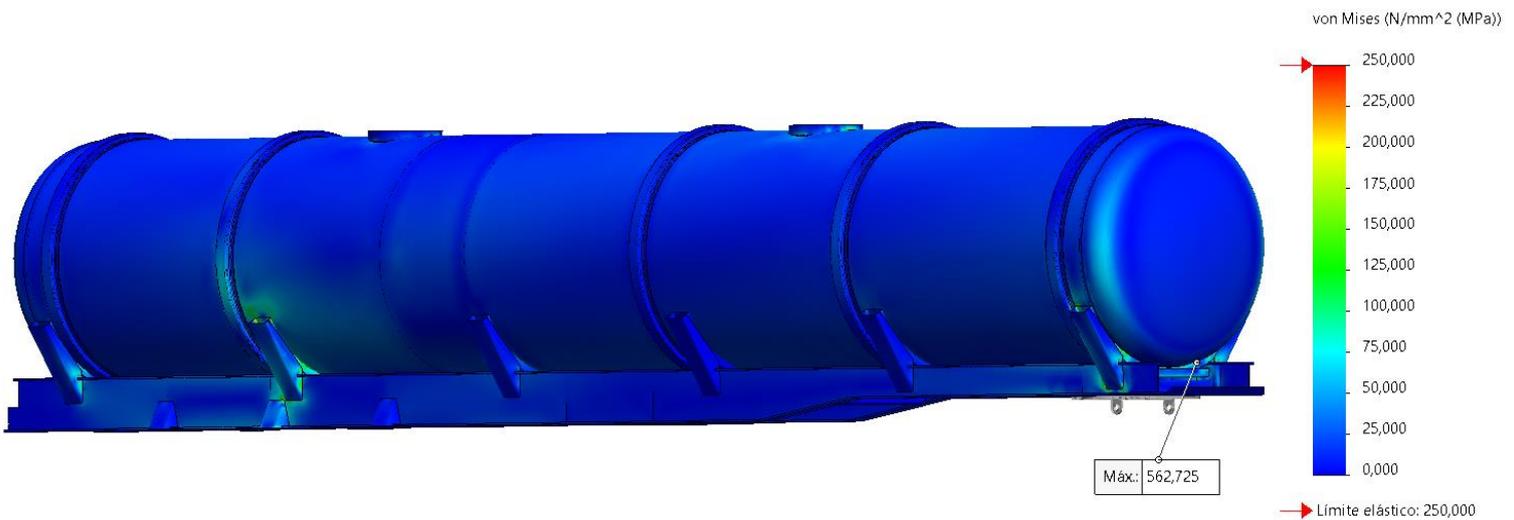


Imagen 56 – Campo de tensiones -> Condición dinámica C.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 57*.

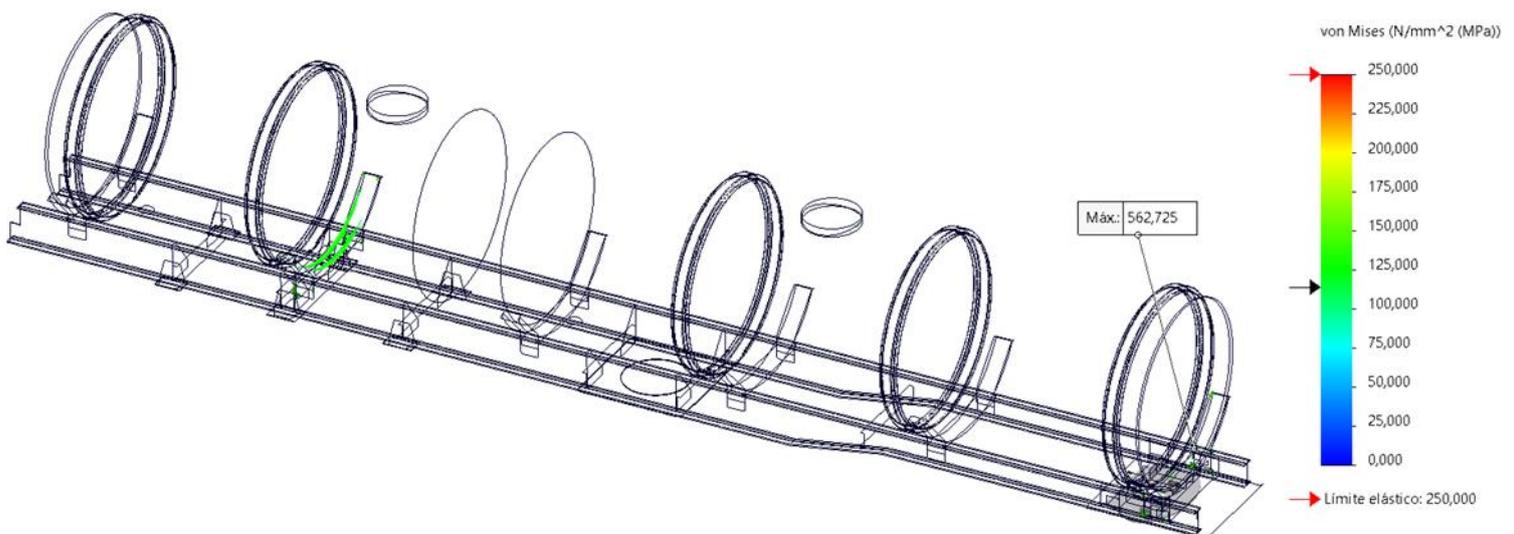


Imagen 57 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica C.

Se comprende que las tensiones generadas están, en su mayoría, por debajo de 114MPa , pero existe una pequeña zona en las que se supera y aparece la misma concentración de tensiones en los brazos de la cuna de apoyo de la cisterna de la condición estática A, como se ve en *Imagen 58*, propio de la geometría del corte del mismo.

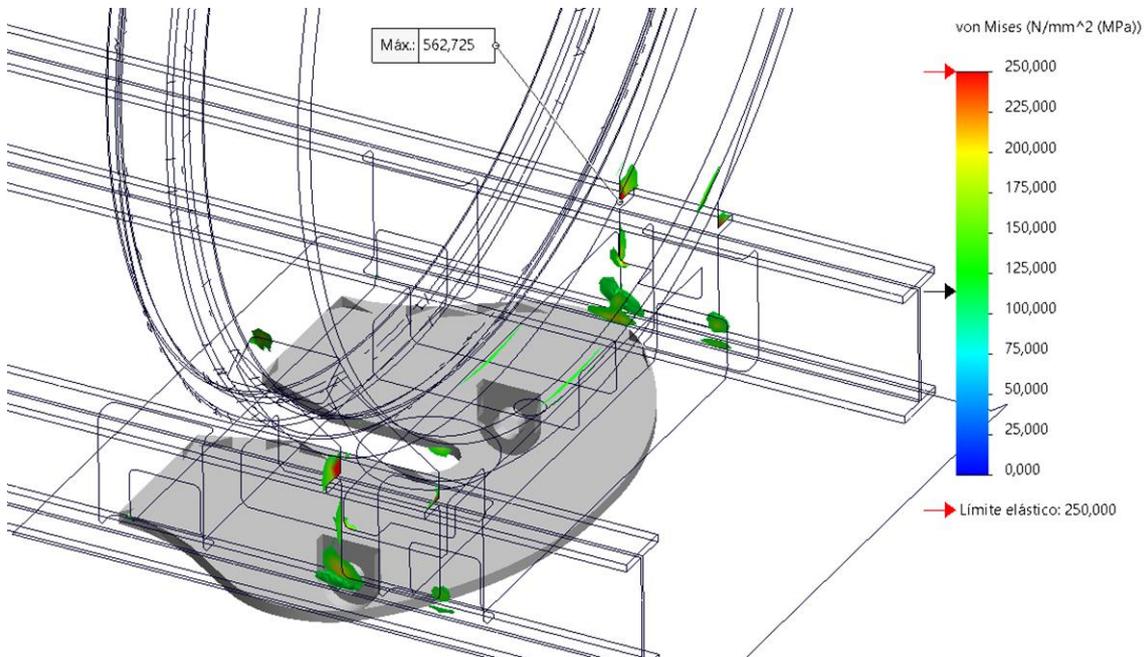


Imagen 58 – Concentrador de tensiones -> Condición dinámica C.

El campo de desplazamientos del semirremolque se muestra en *Imagen 59*. En ella los desplazamientos se encuentran mayorados por un factor de 10 veces y se superpone con el modelo sin deformación para visualizar como deforma el equipo.

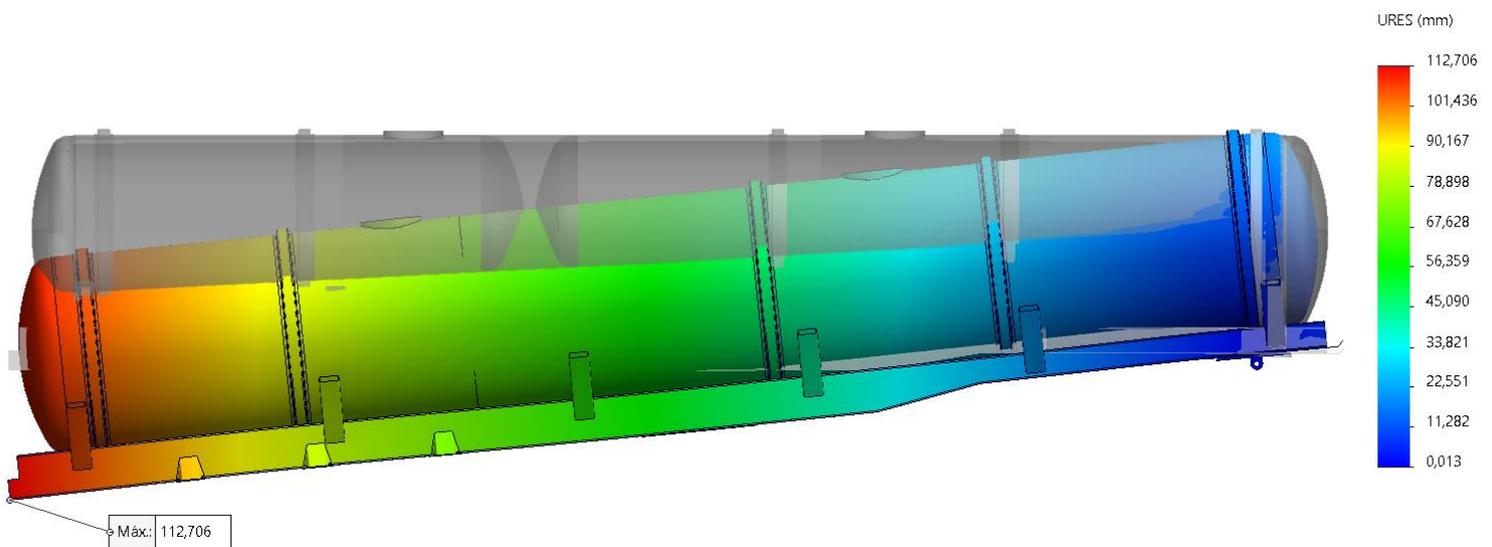


Imagen 59 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica C.

Por último, se obtiene el trazado del factor de seguridad del semirremolque como se muestra en *Imagen 60*.

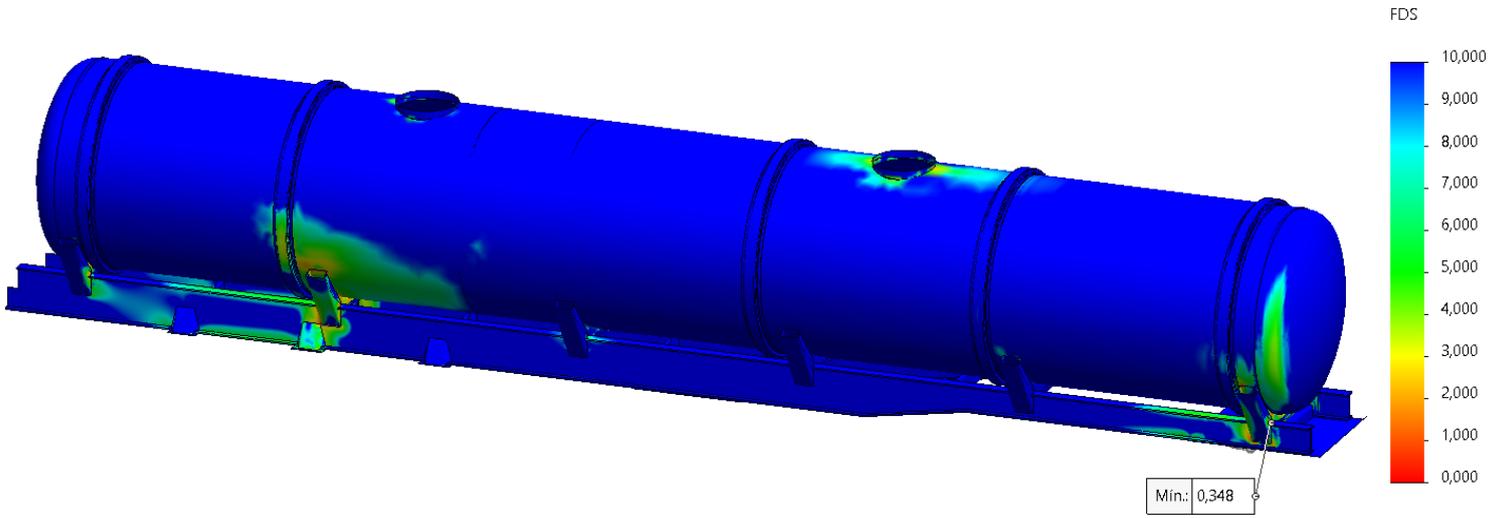


Imagen 60 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica C.

5.6.5. Condición dinámica D

La condición dinámica D consta de dos ítems.

5.6.5.1. Condición de aceleración D

Se establece que, además de la carga debida al peso de la sustancia transportada, la presión de trabajo y la gravedad, el semirremolque debe someterse a una carga longitudinal con sentido de circulación del mismo, aplicada en el plato de enganche cuyo valor debe ser el 70% de la carga reactiva en dicha vinculación, calculada en la sección 5.2, como se muestra en *Imagen 61*.

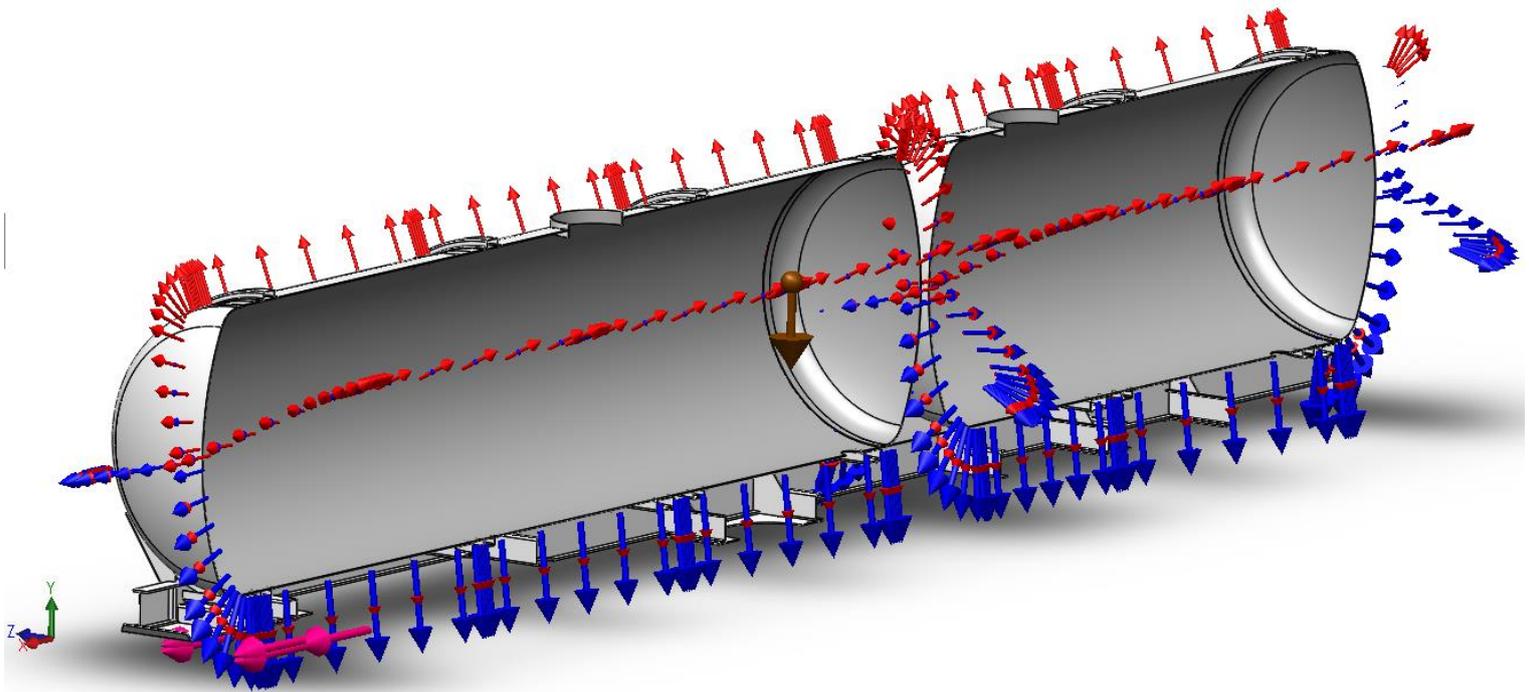


Imagen 61 – Cargas -> Condición dinámica D -> Vista en corte.

El campo de tensiones obtenidos debido a los esfuerzos generados por dicha condición se muestra en *Imagen 62*.

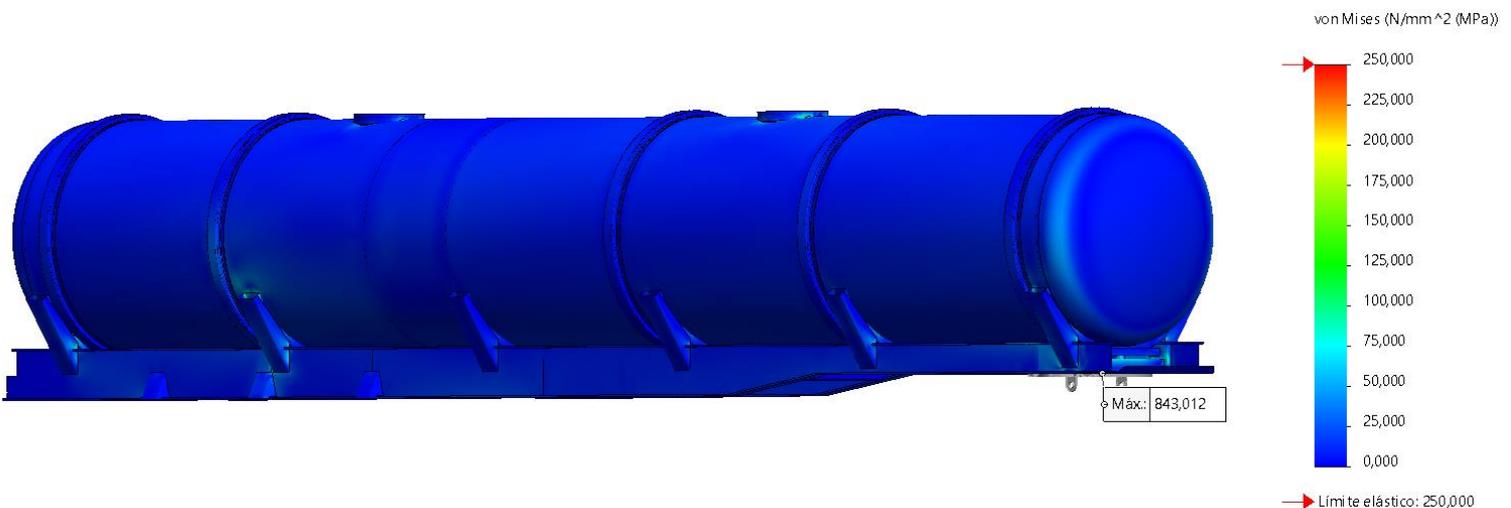


Imagen 62 – Campo de tensiones -> Condición dinámica D.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 63*.

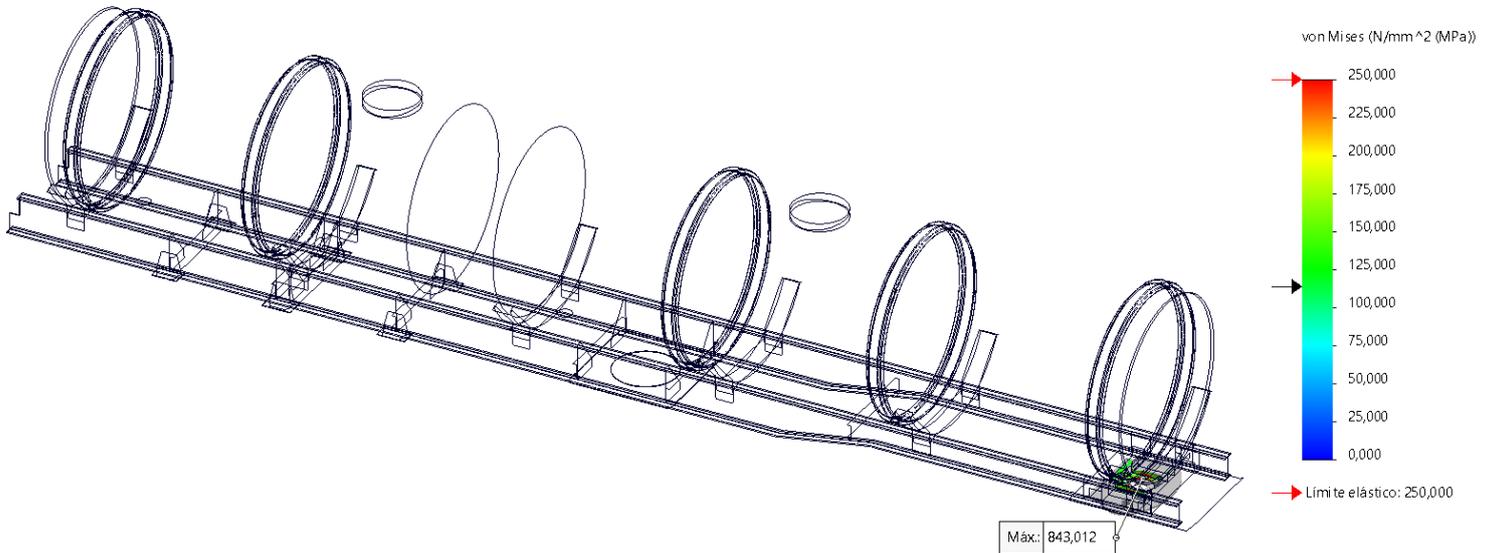


Imagen 63 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114 MPa -> Condición dinámica D.

Se comprende que las tensiones generadas están, en su mayoría, por debajo de 114MPa, pero existe una pequeña zona en las que se supera y aparece la misma concentración de tensiones en los brazos de la cuna de apoyo de la cisterna de la condición estática A, como se ve en *Imagen 64*, propio de la geometría del corte del mismo.

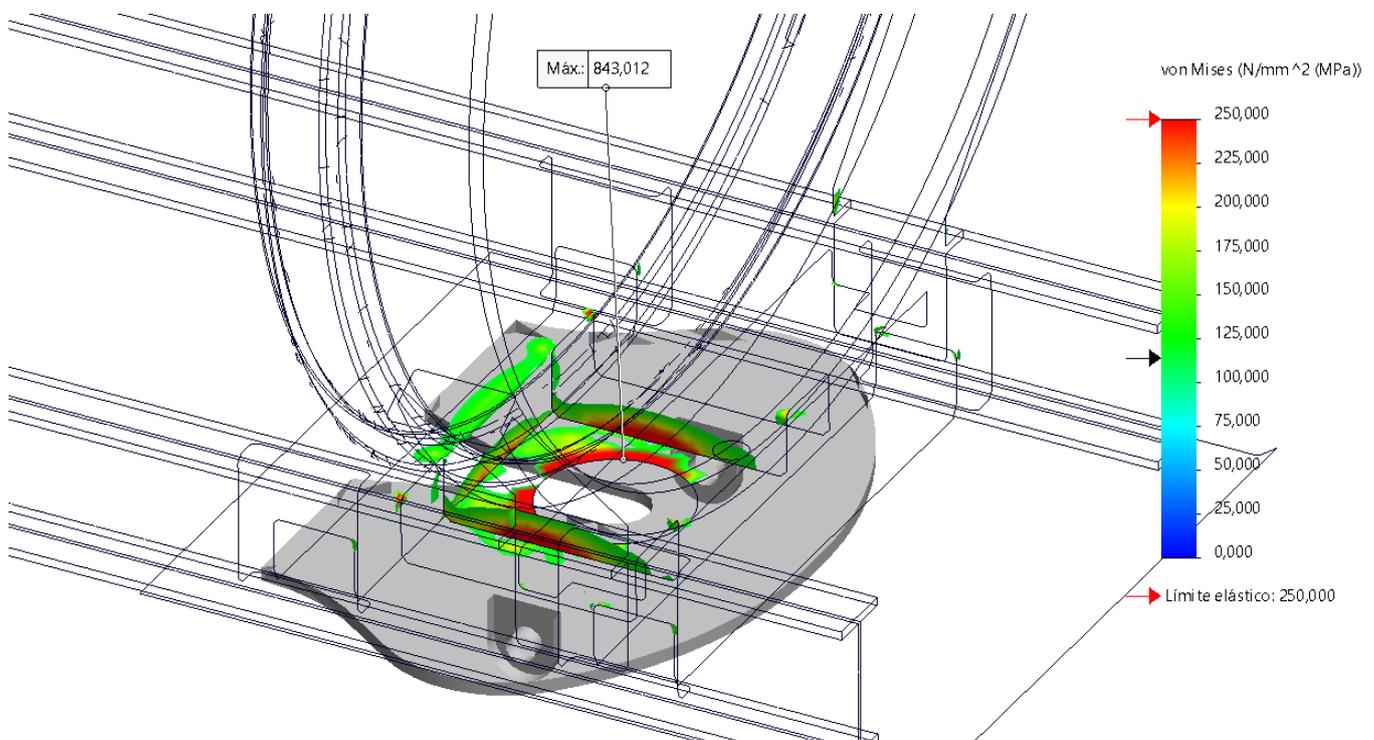


Imagen 64 – Concentración de tensiones -> Condición dinámica D.

El campo de desplazamientos obtenidos se muestra en *Imagen 65*.

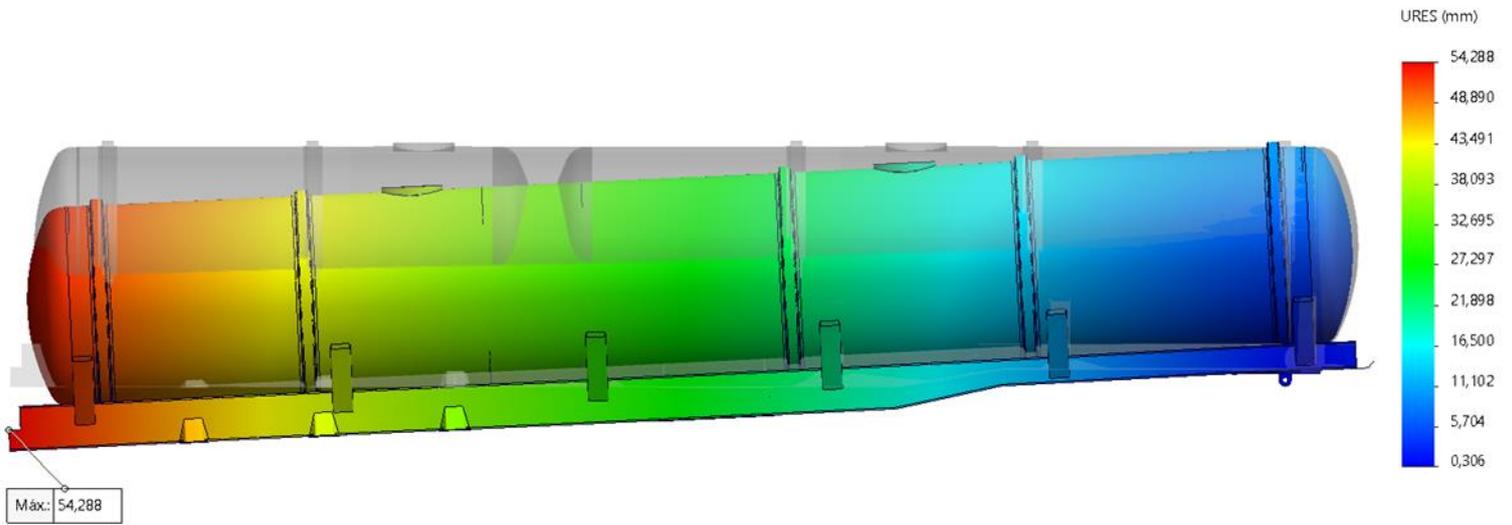


Imagen 65 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica D.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 66*.

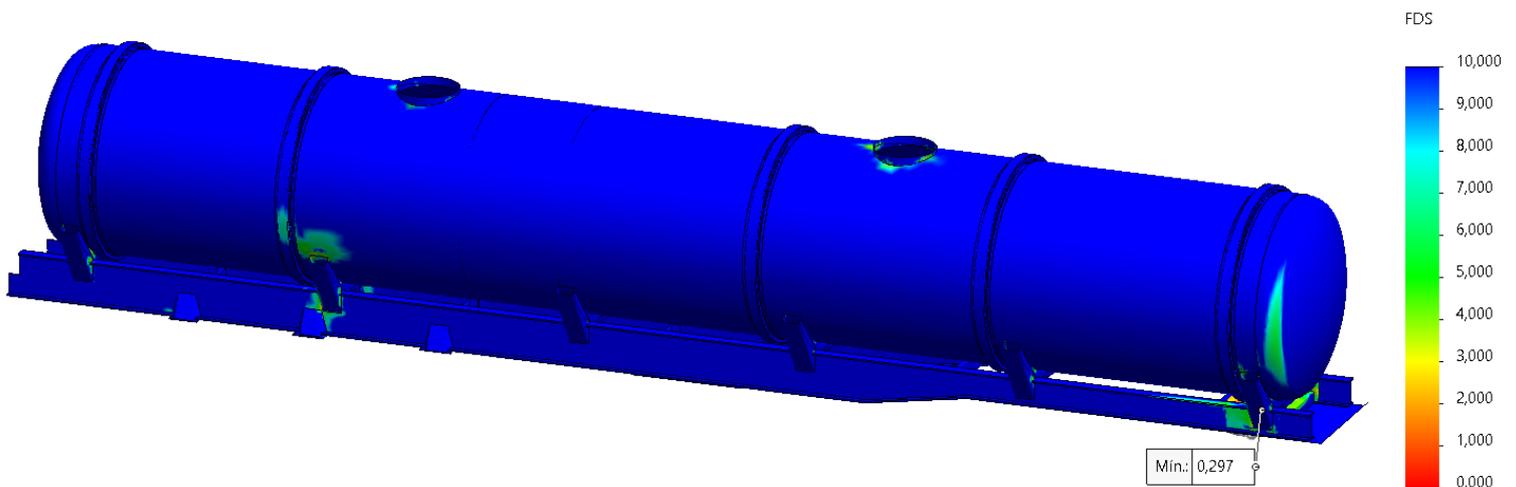


Imagen 66 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica D.

5.6.5.2. Condición de frenado D

Se establece que, además de la carga debida al peso de la sustancia transportada, la presión de trabajo y la gravedad, el semirremolque debe someterse a una carga longitudinal con sentido opuesto al de circulación del mismo, aplicada en el plato de enganche cuyo valor debe ser el 70% de la carga reactiva en dicha vinculación, calculada en la sección 5.2, como se muestra en *Imagen 67*.

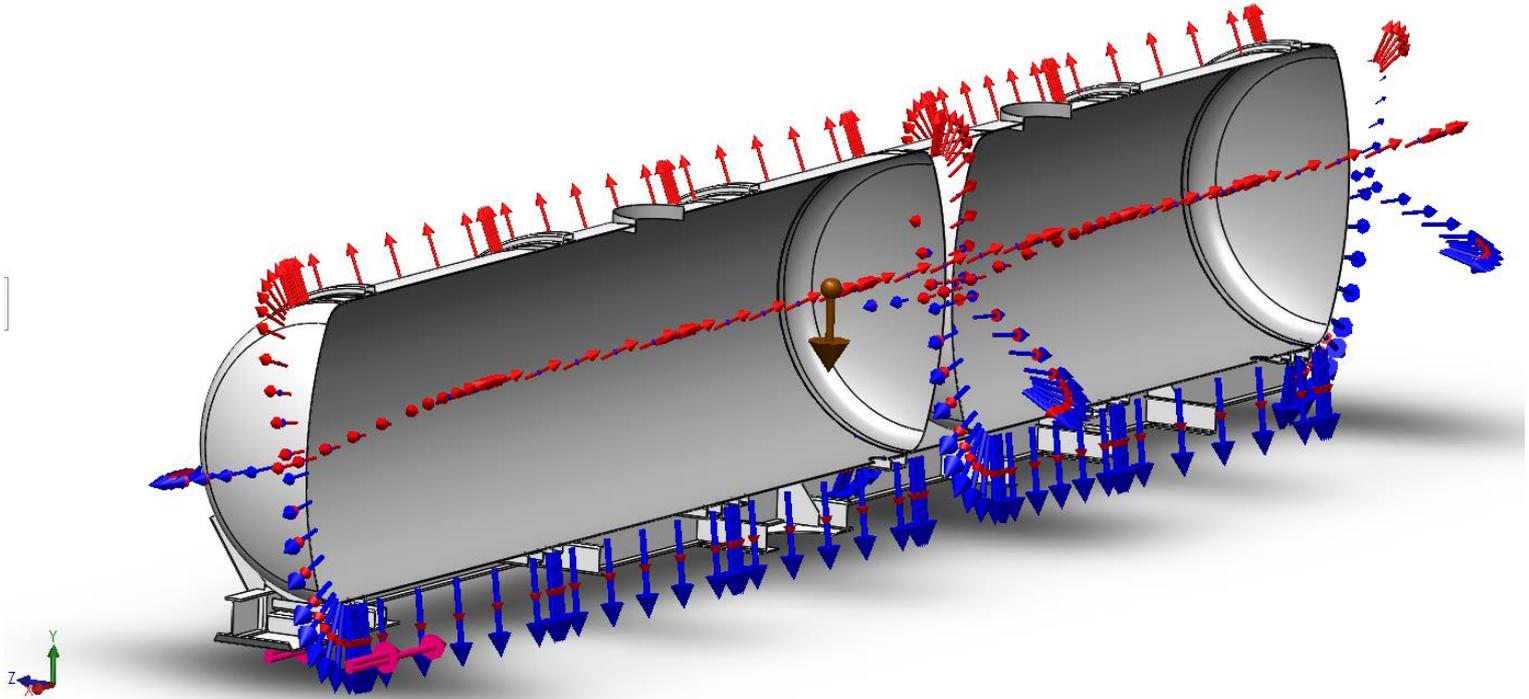


Imagen 67 – Cargas -> Condición dinámica D frenado -> Vista en corte.

El campo de tensiones generado por las solicitaciones se muestra en *Imagen 68*.

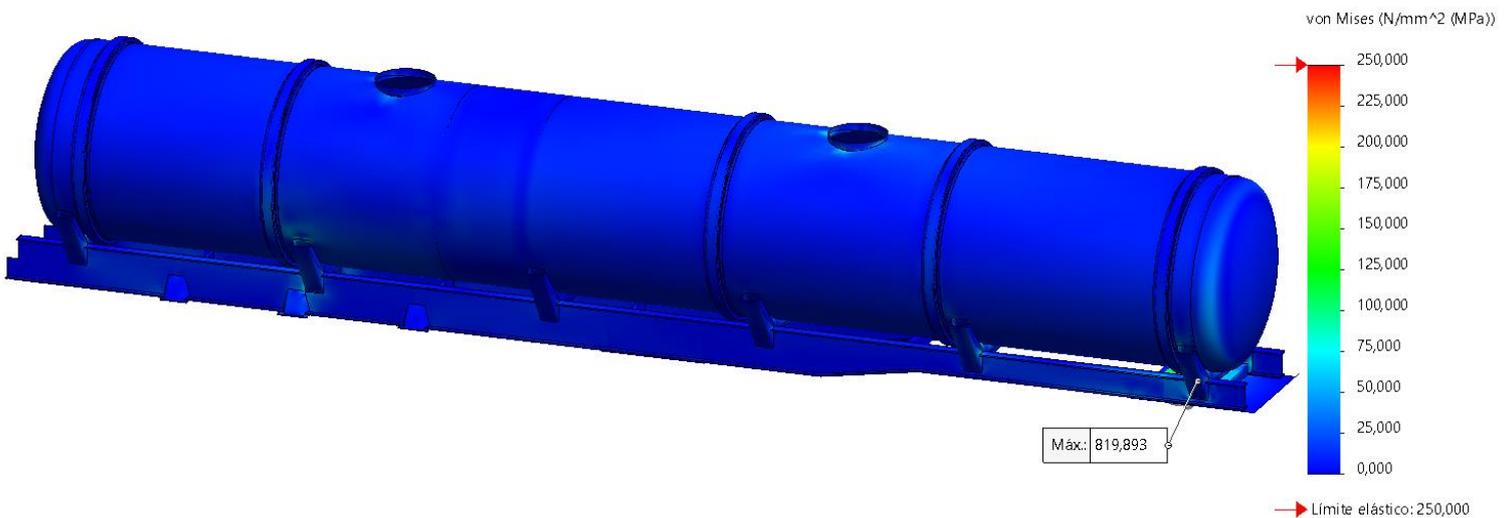


Imagen 68 – Campo de tensiones -> Condición dinámica D frenado.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 69*.

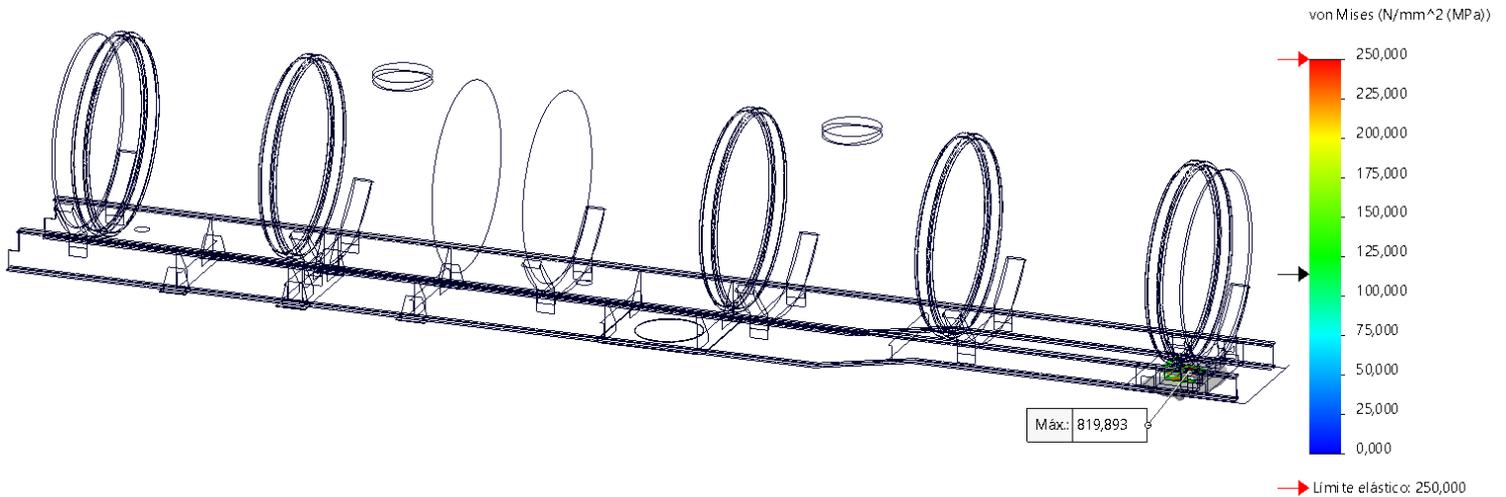


Imagen 69 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica D frenado.

Se comprende que las tensiones generadas están, en su mayoría, por debajo de 114MPa , pero existe una pequeña zona en las que se supera y aparece la misma concentración de tensiones en los brazos de la cuna de apoyo de la cisterna de la condición estática A, como se ve en *Imagen 70*, propio de la geometría del corte del mismo.

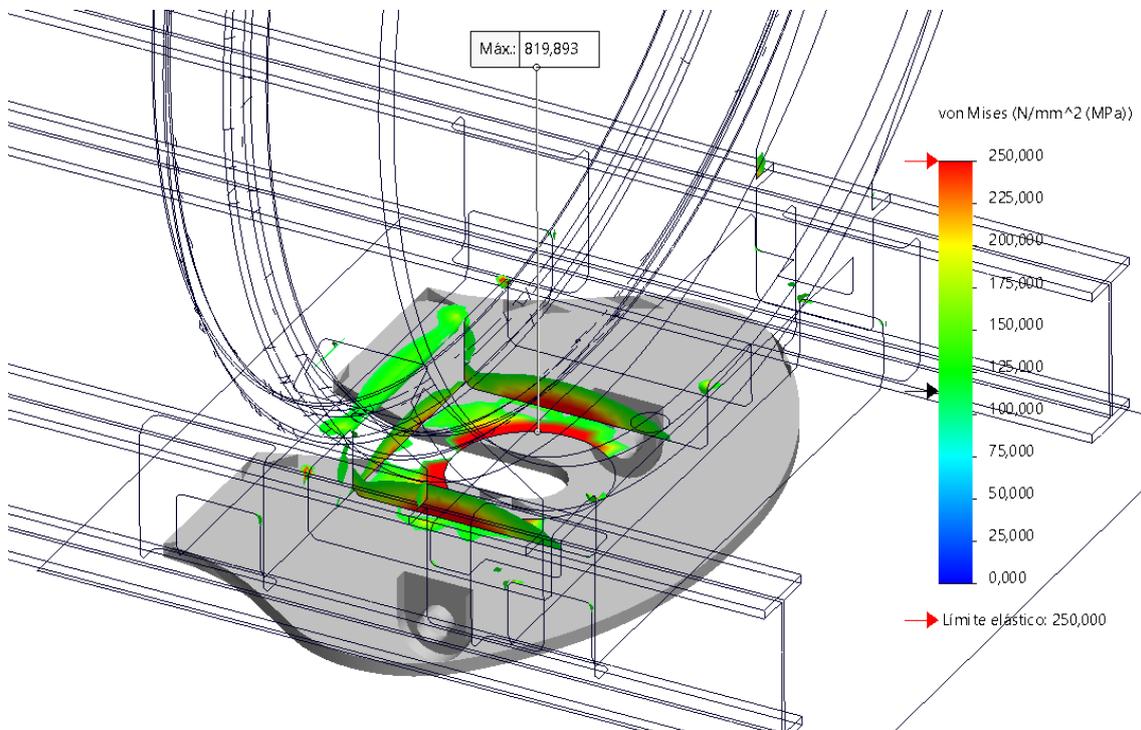


Imagen 70 – Concentración de tensiones -> condición dinámica D frenado.

El campo de desplazamientos obtenido se muestra en *Imagen 71*.

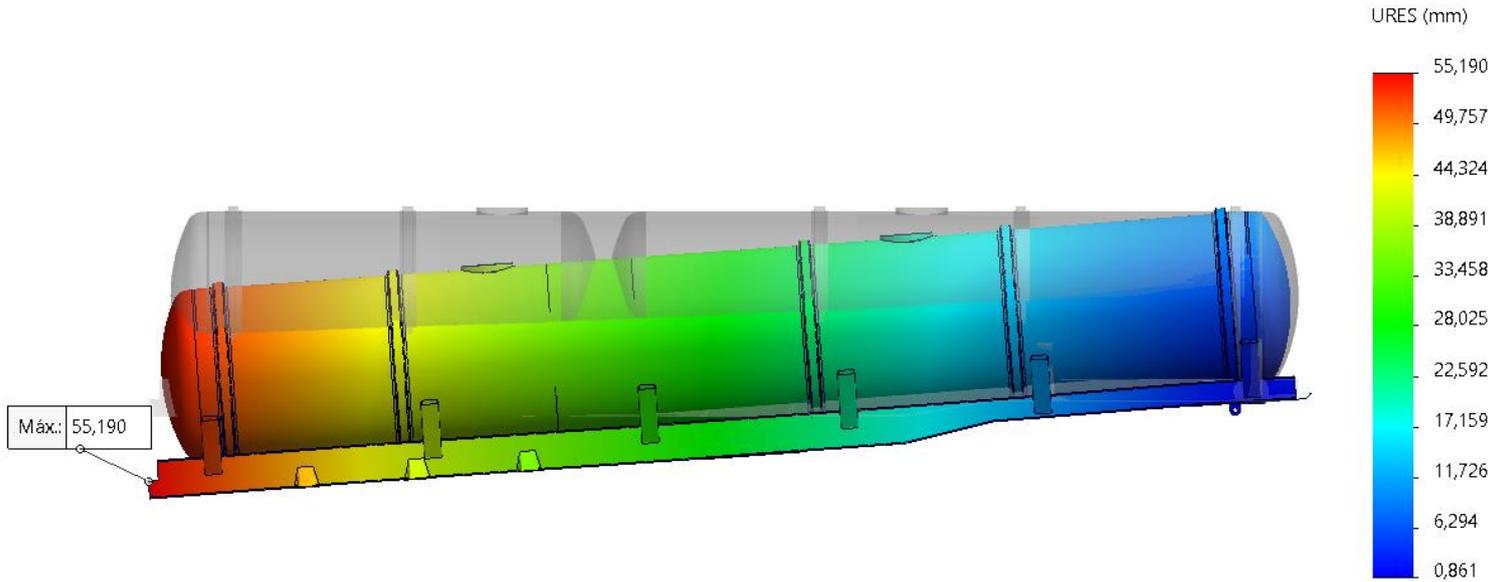


Imagen 71 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica D frenado.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 72*.

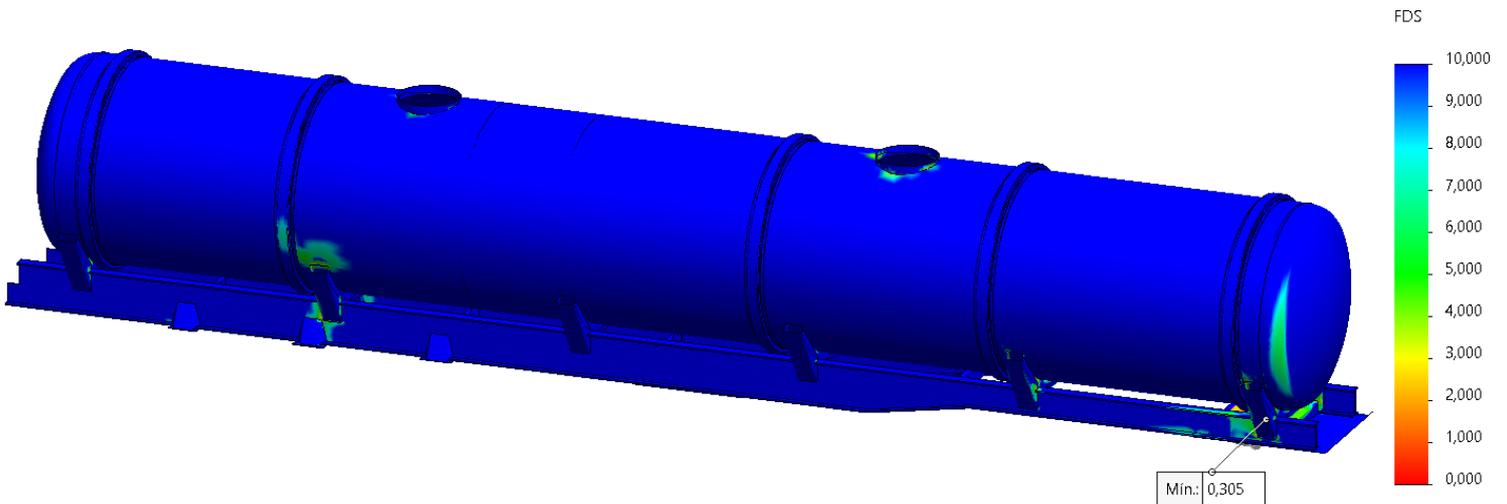


Imagen 72 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica D frenado.

5.6.6. Condición dinámica E

Tal y como lo indica la normativa, se aplica la carga debida al peso de la sustancia transportada en forma de presión hidrostática, pero con una salvedad. En este caso la presión se define perpendicular al plano que corta longitudinalmente al semirremolque como se muestra en **Imagen 73**. De esta forma logramos obtener la fuerza ejercida por la masa del líquido contenido en dirección transversal a la dirección de circulación del equipo. Resaltamos además la aplicación de la carga debida a la acción de la gravedad en la misma dirección y la aplicación de la presión de trabajo.

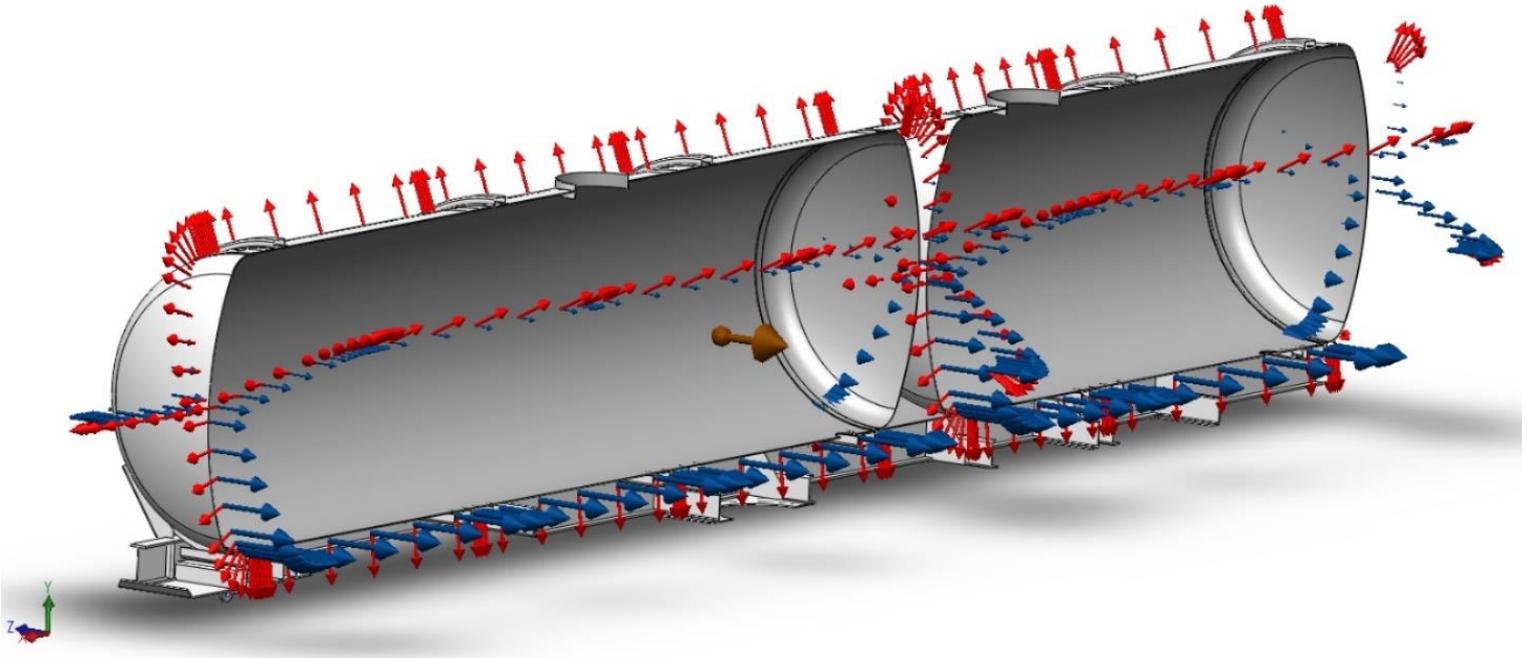


Imagen 73 – Cargas → Condición dinámica E -> Vista en corte.

El campo de tensiones resultante del escenario de carga establecido se muestra en **Imagen 74**.

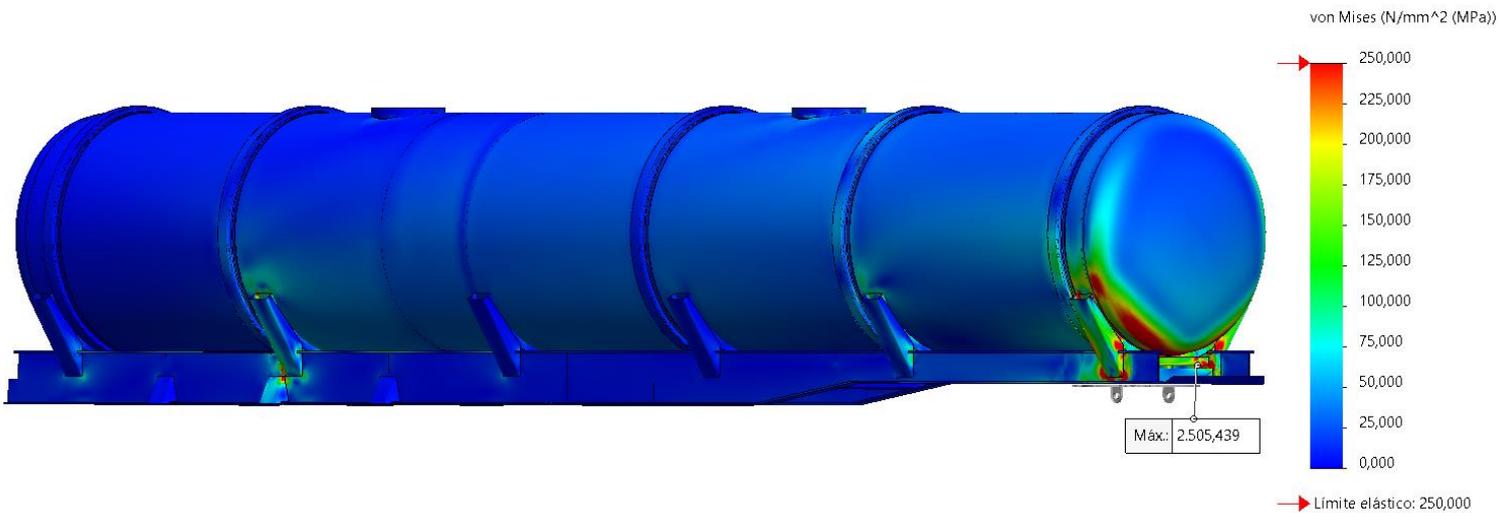


Imagen 74 – Campo de tensiones -> Condición dinámica E.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en **Imagen 75**.

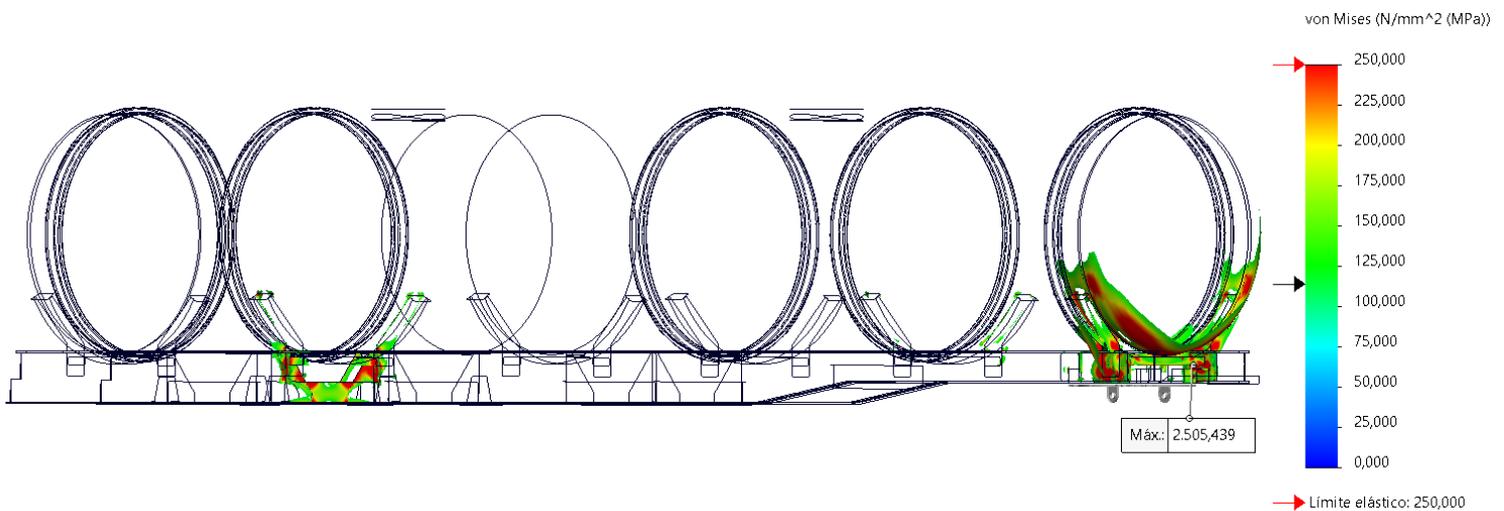


Imagen 75 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición dinámica E.

Con la finalidad de filtrar aún más los resultados y entender si superamos la fluencia del material, se traza una ISO superficie en 250MPa como se muestra en **Imagen 76**.

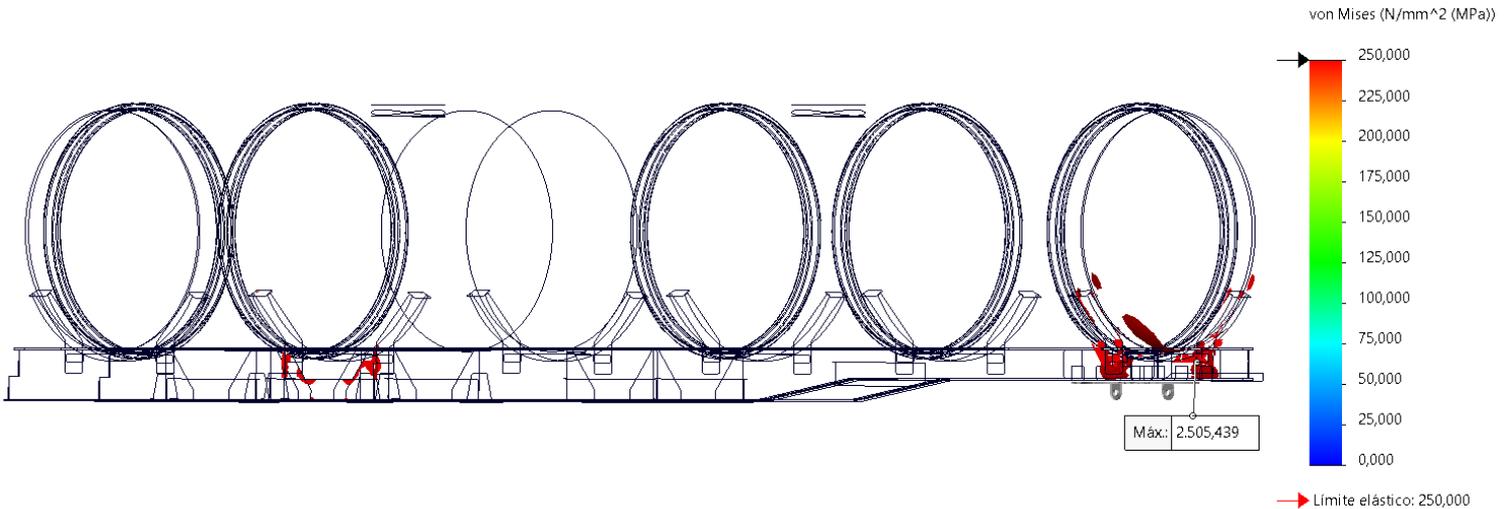


Imagen 76 – Campo de tensiones -> ISO superficie 250MPa -> Condición dinámica E.

Debido a la naturaleza de la carga en cuestión, es importante visualizar en detalle el campo de desplazamientos (el cual se encuentra mayorado por un factor de 20 veces para comprender la deformada) resultantes como se muestra en **Imagen 77, 78 y 79**.

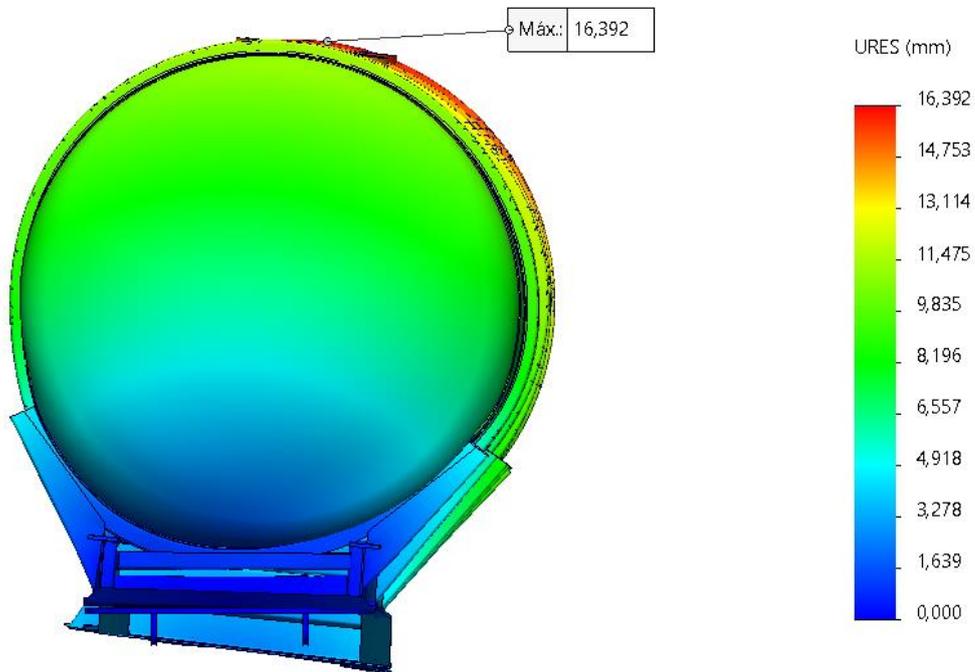


Imagen 77 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista frontal.

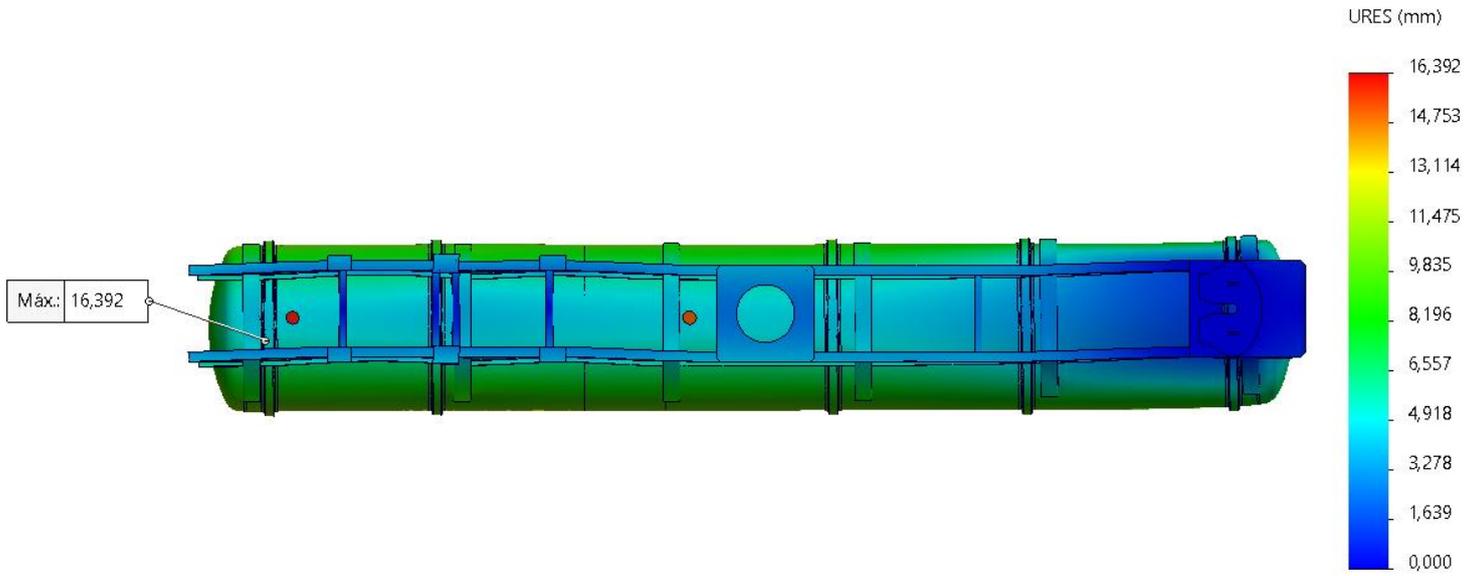


Imagen 78 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista inferior.

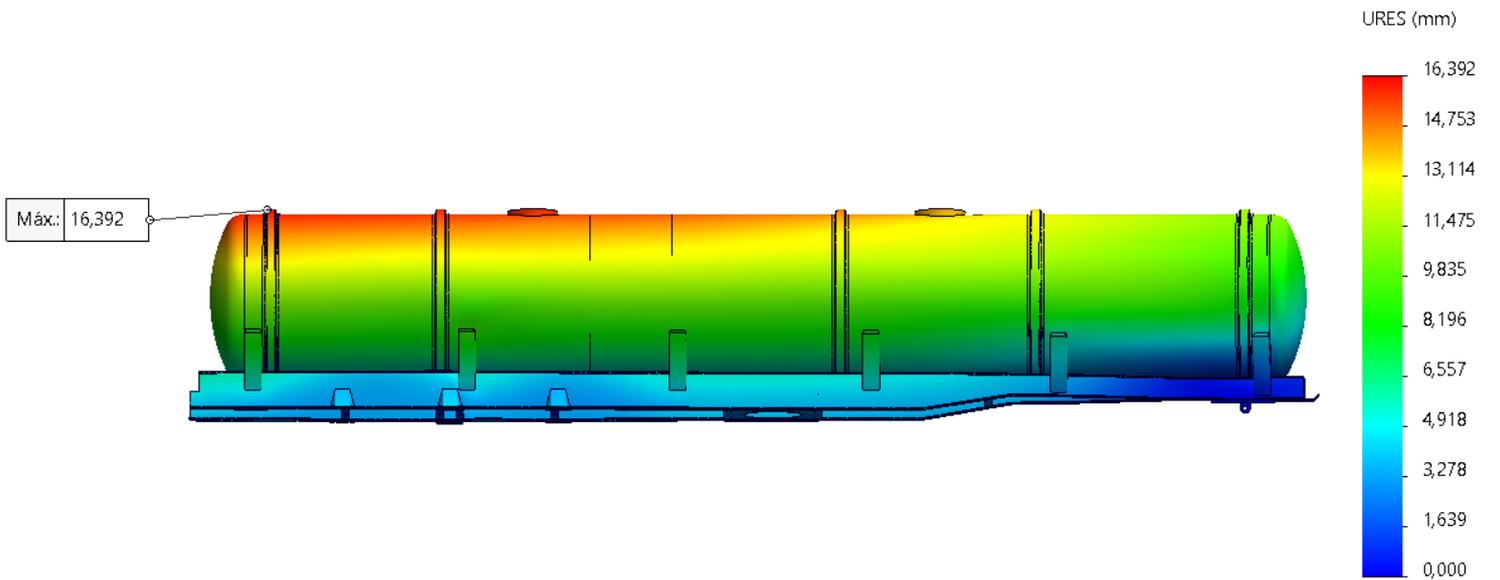


Imagen 79 – Campo de desplazamientos -> Condición dinámica E -> Vista lateral.

Por último, se traza la distribución del factor de seguridad como se muestra en *Imagen 80*.

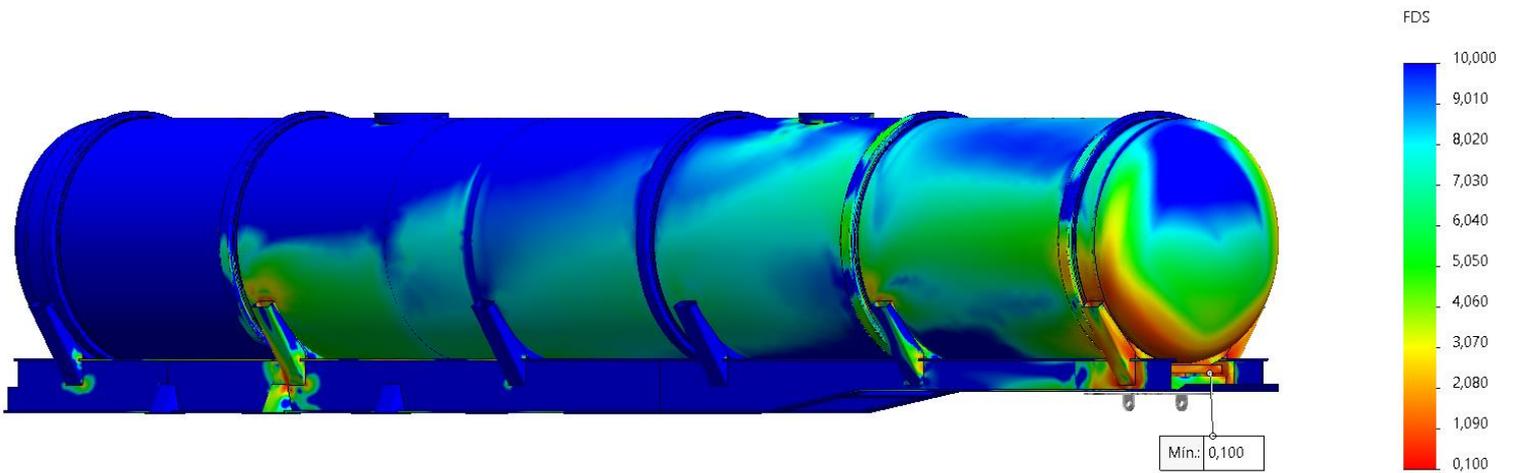


Imagen 80 – Trazado del factor de seguridad -> Condición dinámica E.

5.6.7. Condición estática F

Tal y como lo indica la normativa, se aplica la carga debida al peso de la sustancia transportada en forma de presión hidrostática y sujeta a la acción de **2g** de gravedad, pero con una salvedad. En este caso la presión se define perpendicular al plano que corta transversalmente al semirremolque como se muestra en *Imagen 81*. De esta forma logramos obtener la fuerza ejercida por la masa del líquido contenido en dirección de circulación del equipo. Resaltamos además la aplicación de la carga debida a la acción de la gravedad en la misma dirección y la aplicación de la presión de trabajo.

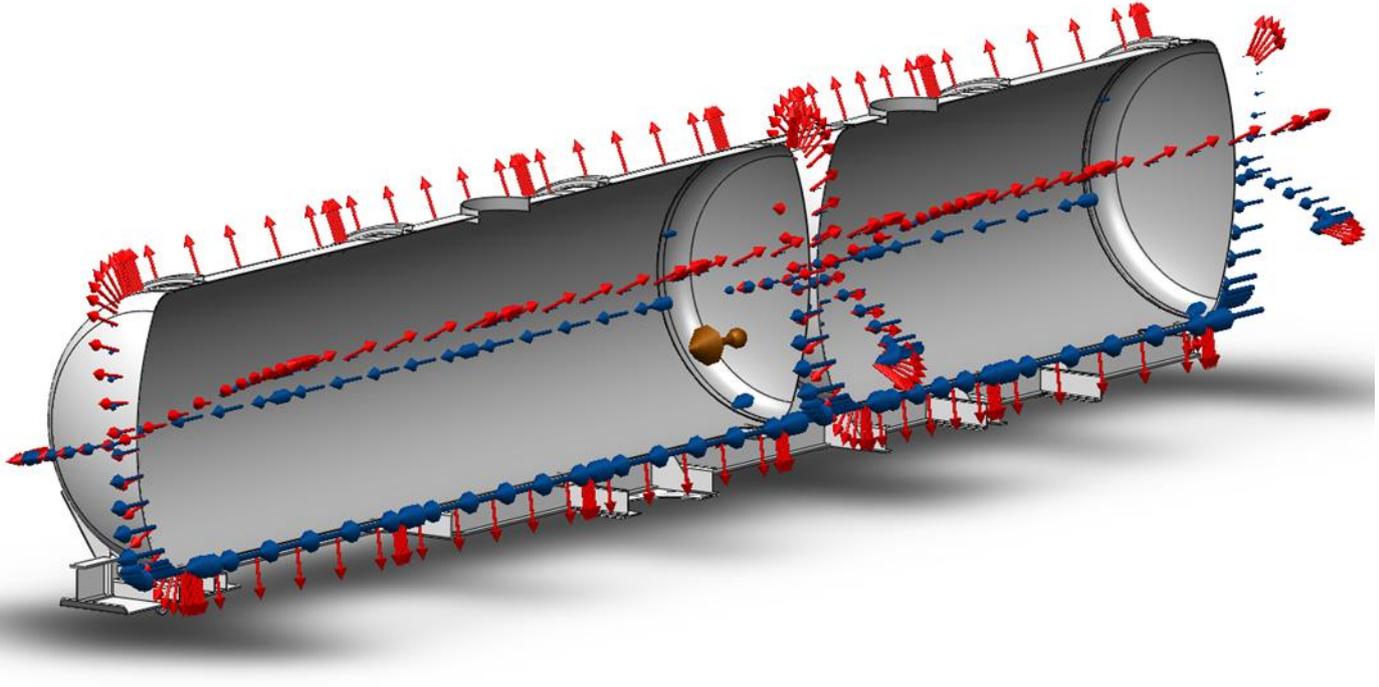


Imagen 81 – Cargas -> Condición estática F.

El campo de tensiones resultante del escenario de carga establecido se muestra en *Imagen 82*.

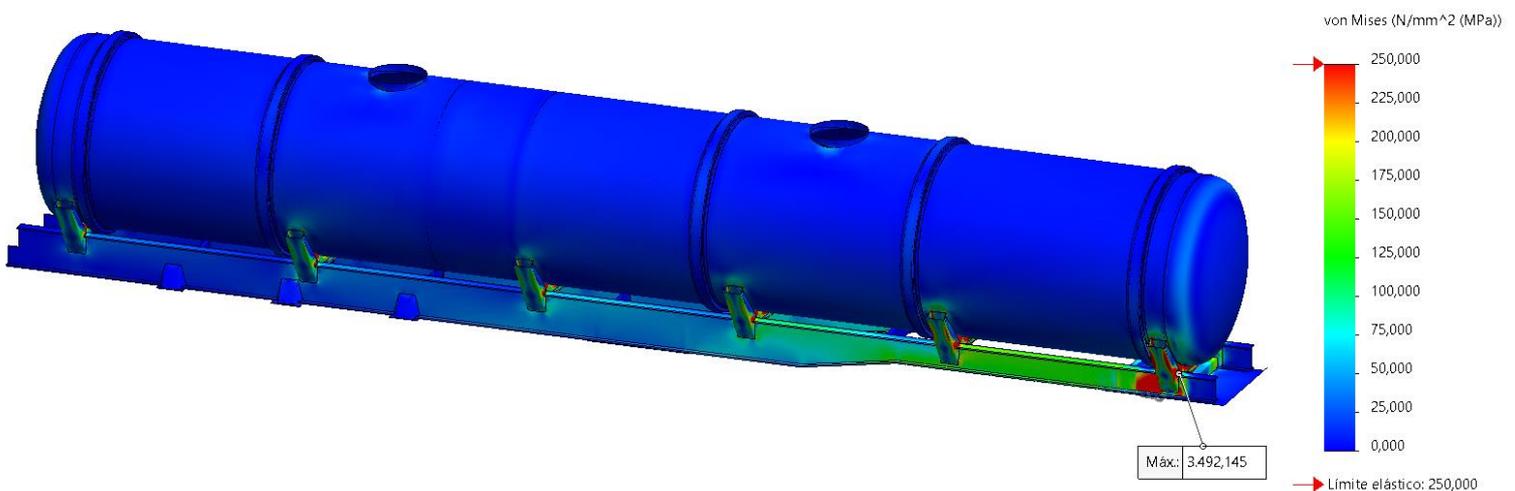


Imagen 82 – Campo de tensiones -> Condición estática F.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 83*.

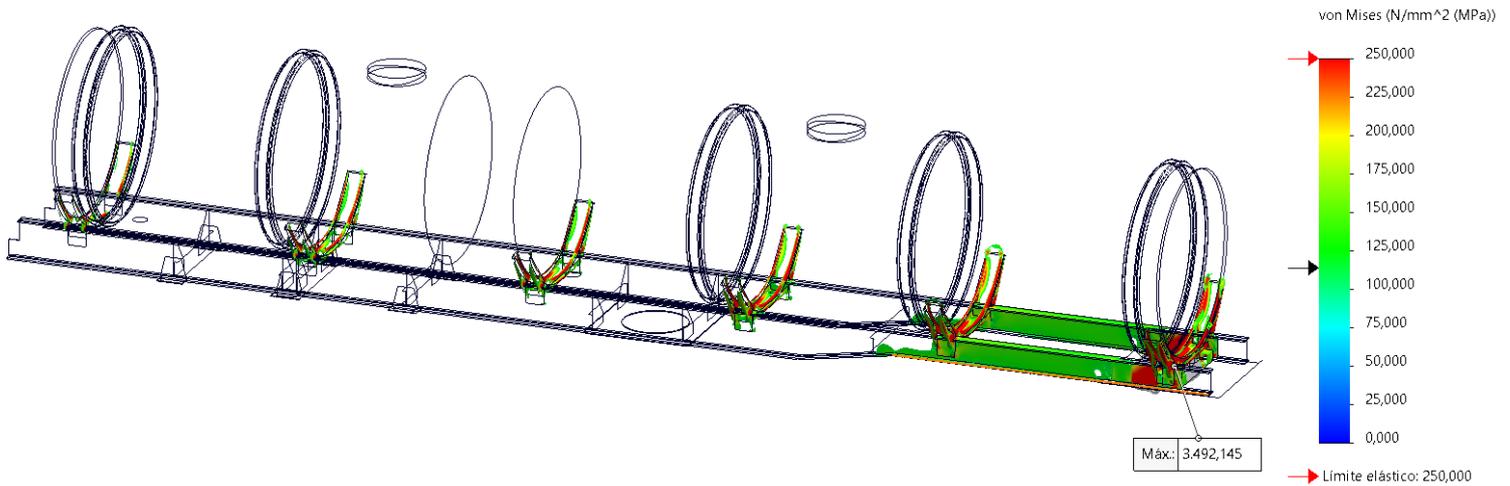


Imagen 83 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática F.

El campo de desplazamientos se muestra en *Imagen 84*.

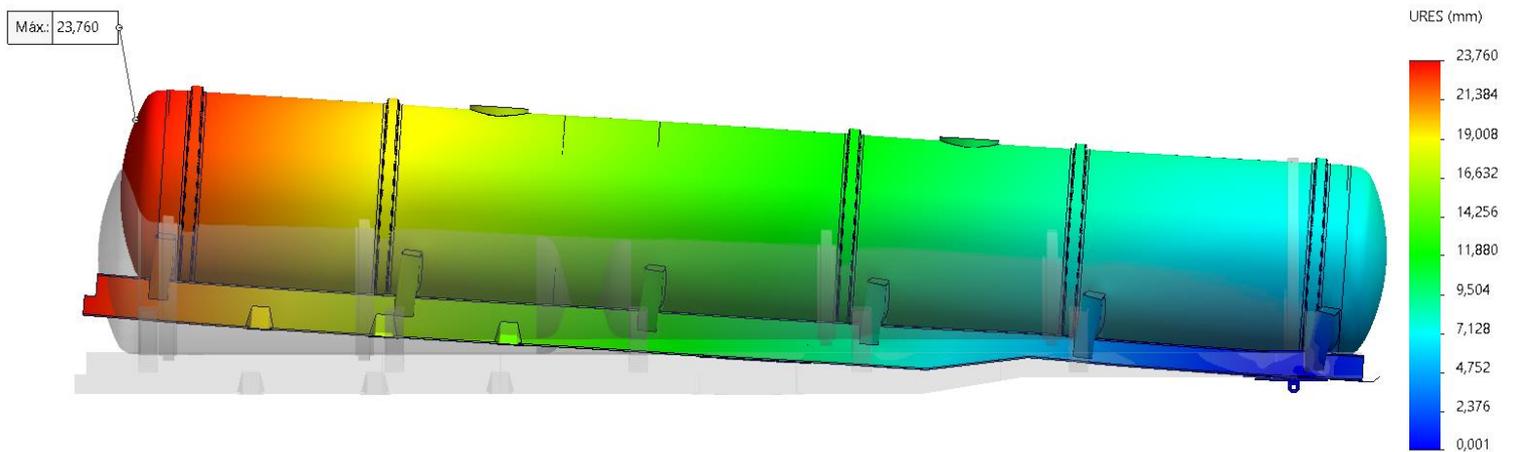


Imagen 84 – Campo de desplazamientos-> Condición estática F.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 85*.

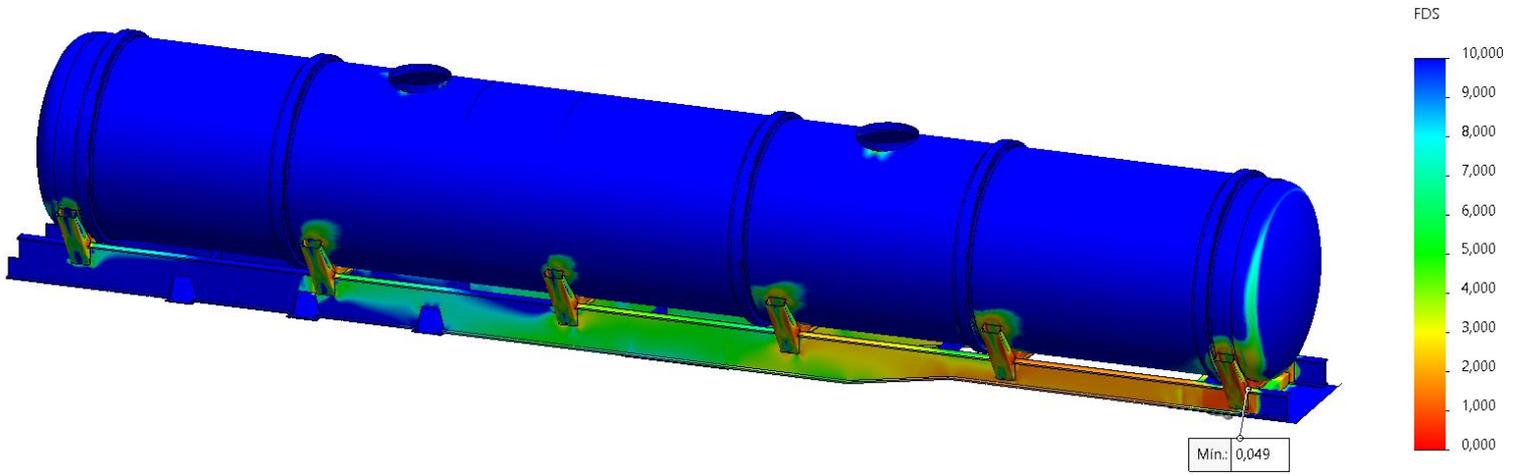


Imagen 85 – Trazado del factor de seguridad -> Condición estática F.

5.6.8. Condición estática G

La situación de carga queda definida de la misma manera que se hizo para la condición estática A (ver sección 5.6.1. *Condición estática A*) con la salvedad de que en esta condición la presión crece con la dirección Y sentido +Y al igual que la gravedad, como se muestra en *Imagen 86*.

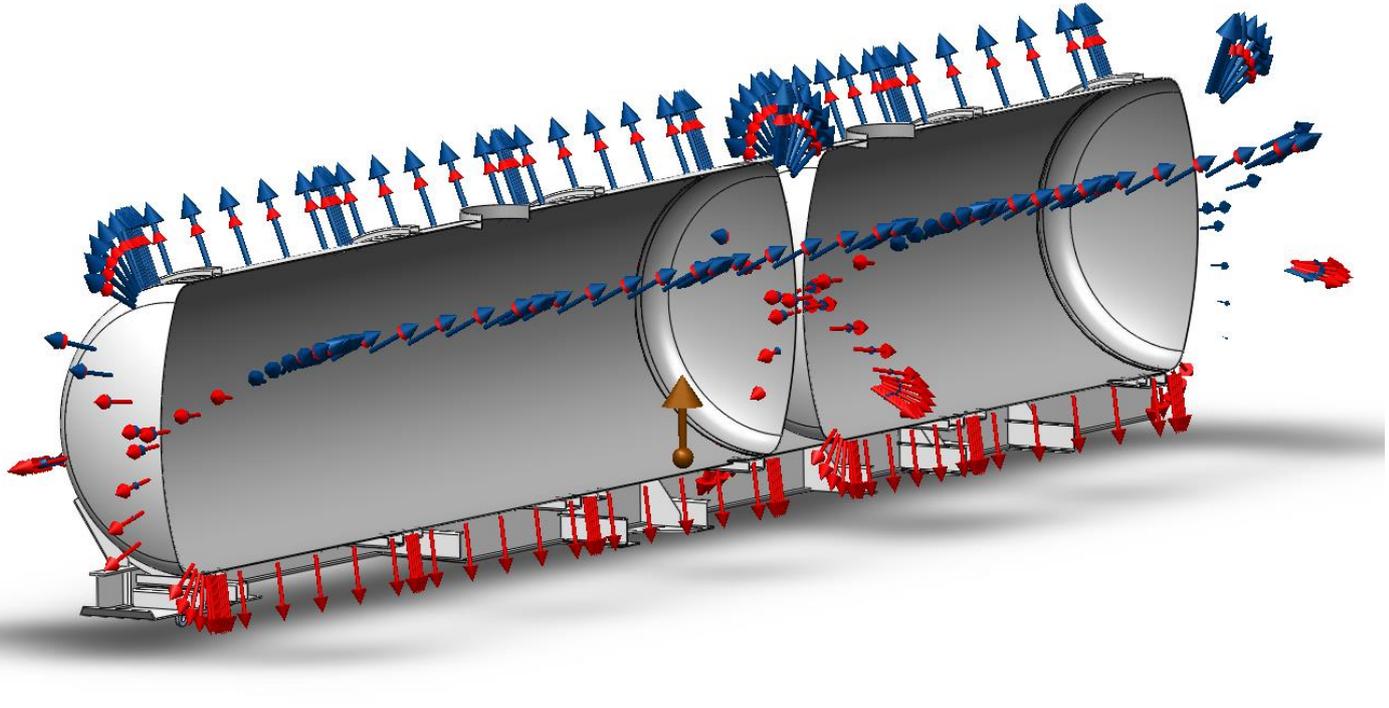


Imagen 86 – Cargas -> Condición estática G -> Vista en corte.

87. El campo de tensiones asociado a dicha condición de cargas se muestra en *Imagen*

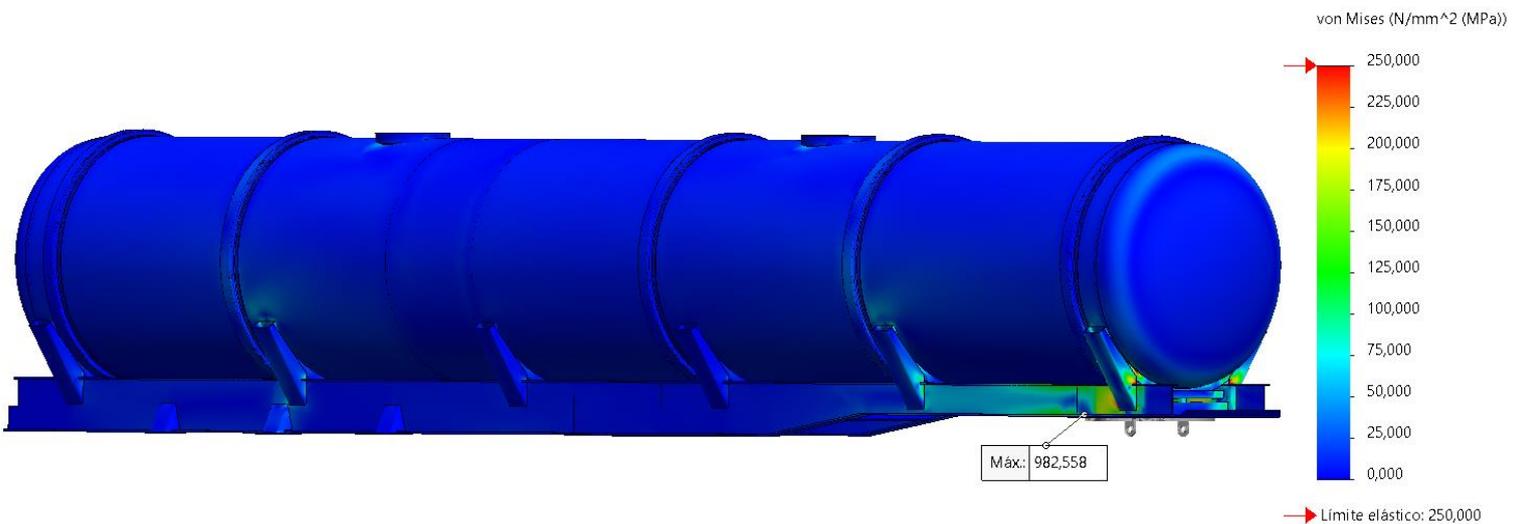


Imagen 87 – Campo de tensiones -> Condición estática G.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 88*.

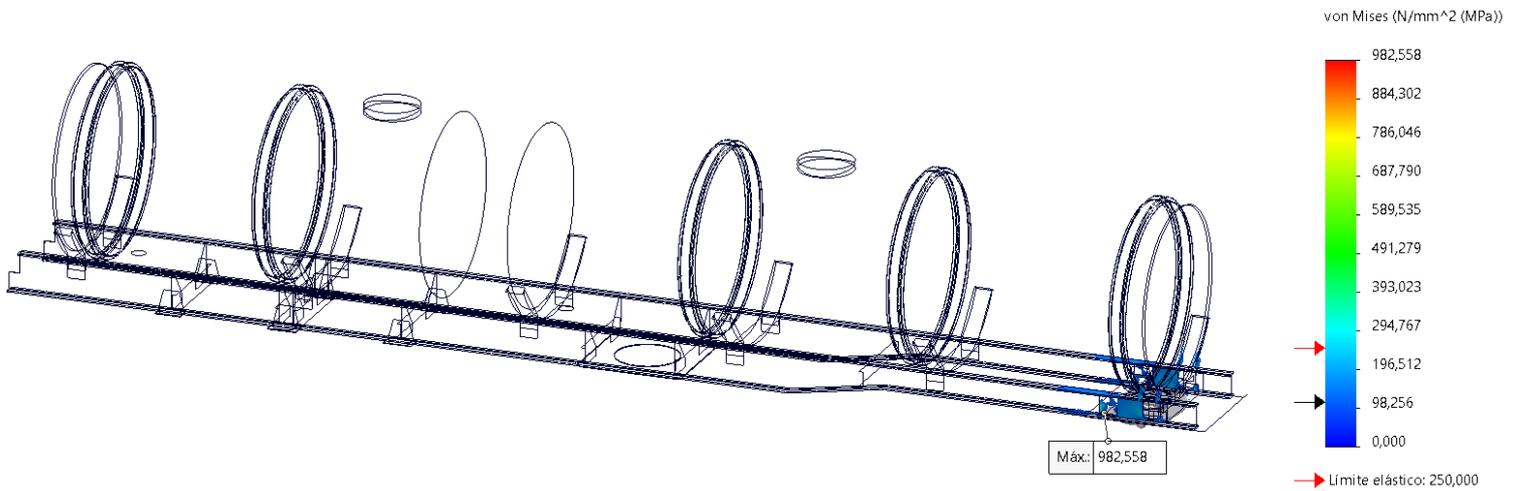


Imagen 88 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición estática G.

Con la finalidad de filtrar aún más los resultados y entender si superamos la fluencia del material, se traza una ISO superficie en 250MPa como se muestra en *Imagen 89*.

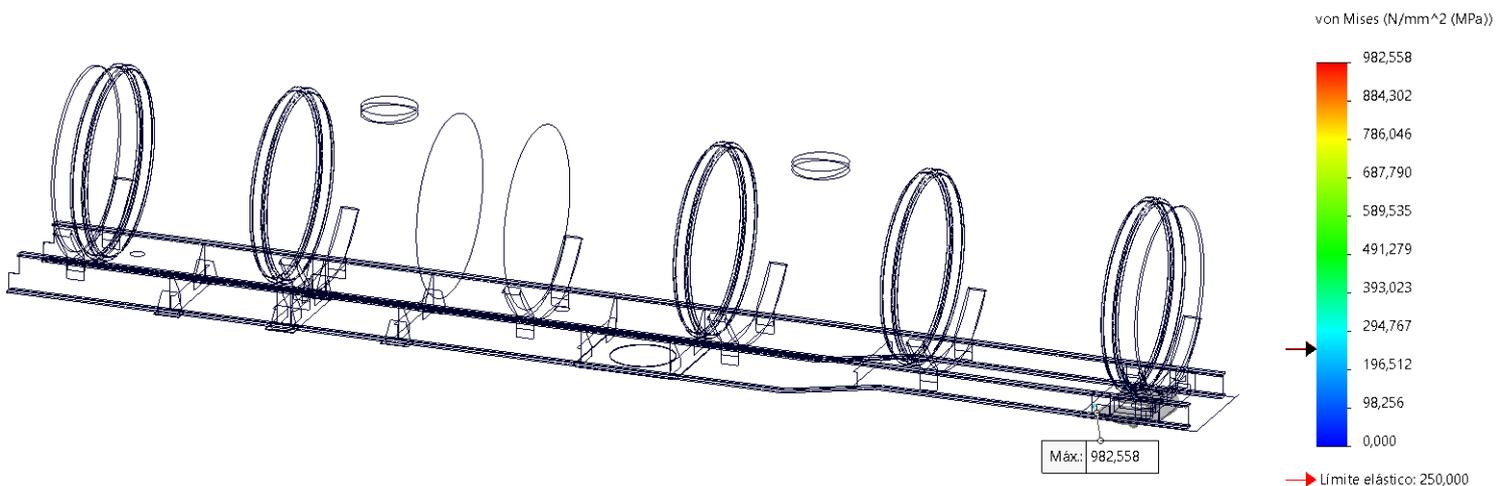


Imagen 89 – Campo de tensiones -> ISO superficie en 250MPa -> Condición estática G.

Se comprende que las tensiones generadas están, en su mayoría, por debajo de 250MPa, pero existe una pequeña zona en las que se supera y aparecen concentraciones de tensiones localizadas en los vértices de algunos perfiles estructurales como se muestra en *Imagen 90*.

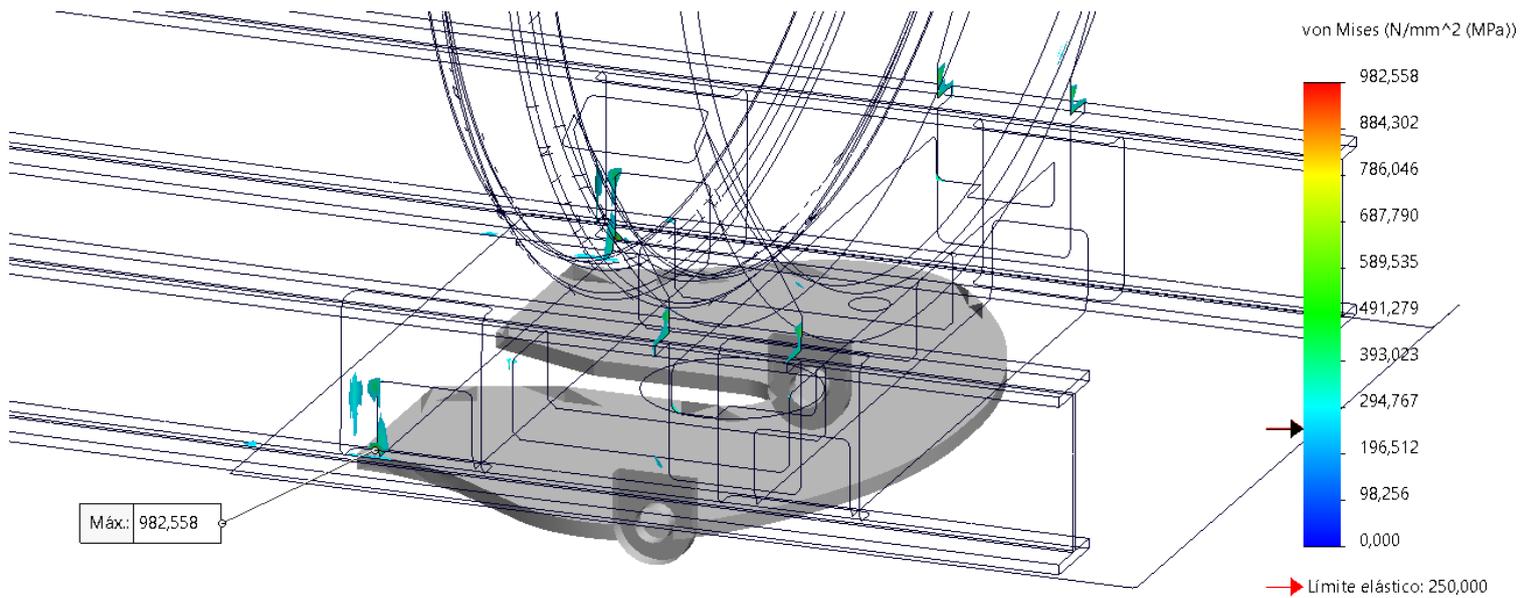


Imagen 90 – Concentración de tensiones -> Condición estática G.

El campo de desplazamientos del semirremolque se muestra en *Imagen 91*. En ella los desplazamientos se encuentran mayorados por un factor de 10 veces y se superpone con el modelo sin deformación para visualizar como deforma el equipo.

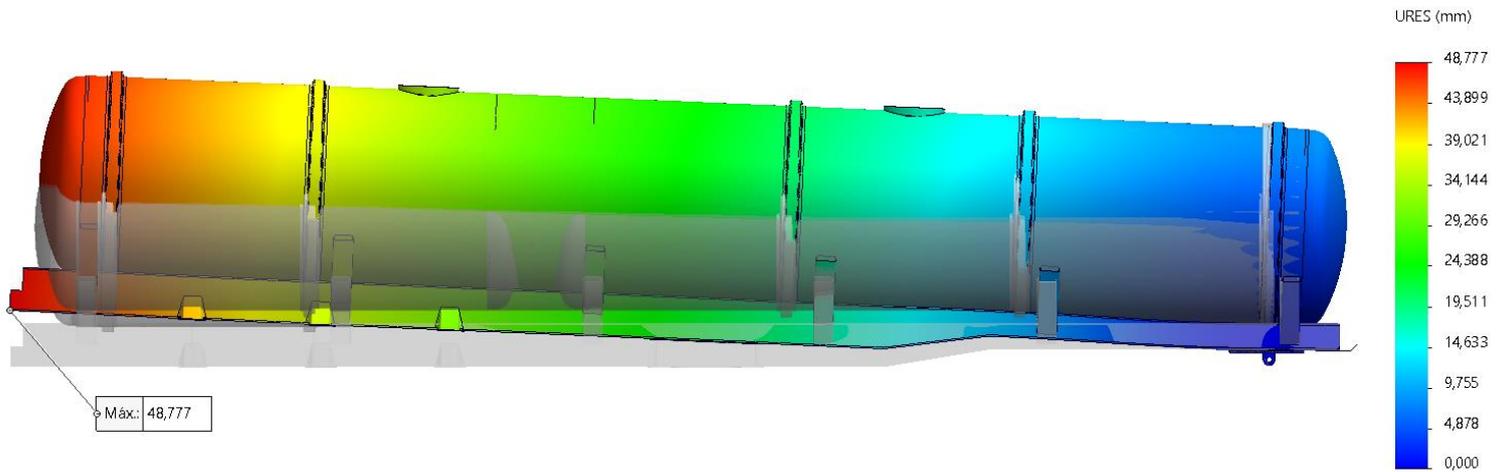


Imagen 91 – Campo de desplazamientos -> Condición estática G.

Por último, se traza la distribución del factor de seguridad como se muestra en *Imagen 92*.

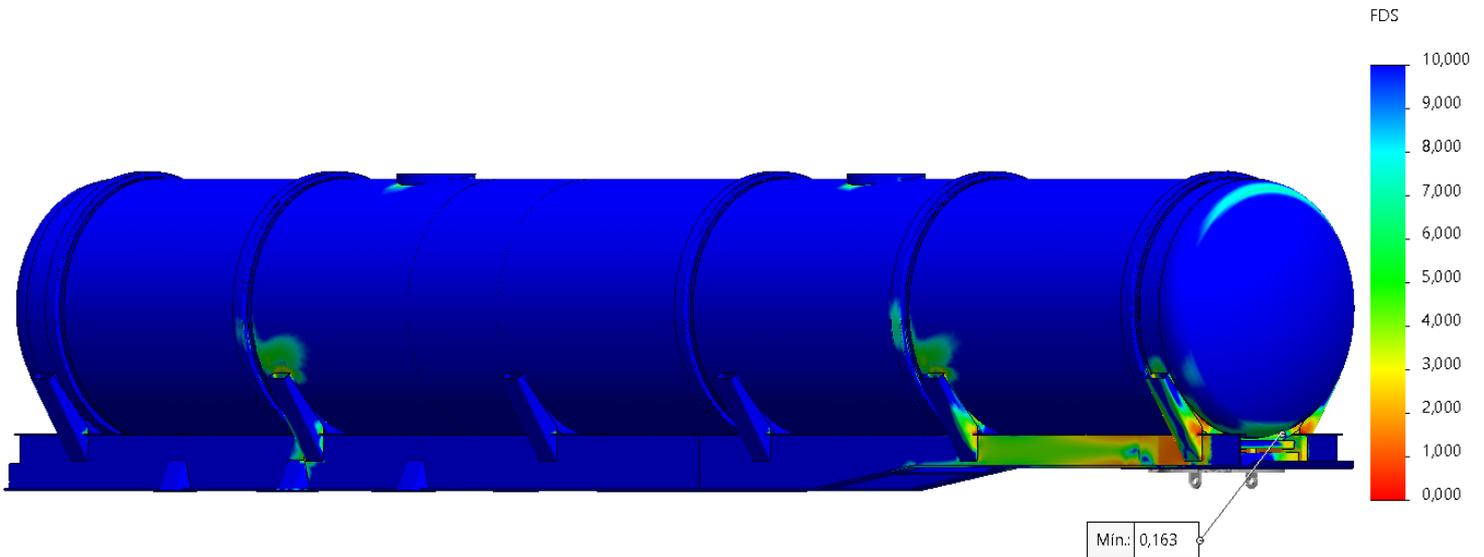


Imagen 92 – Trazado del factor de seguridad -> Condición estática G.

5.6.9. Condición estática H

Se somete a la cisterna a una presión interna cuyo valor resulta $0,21\text{MPa}$ como se muestra en *Imagen 93*.

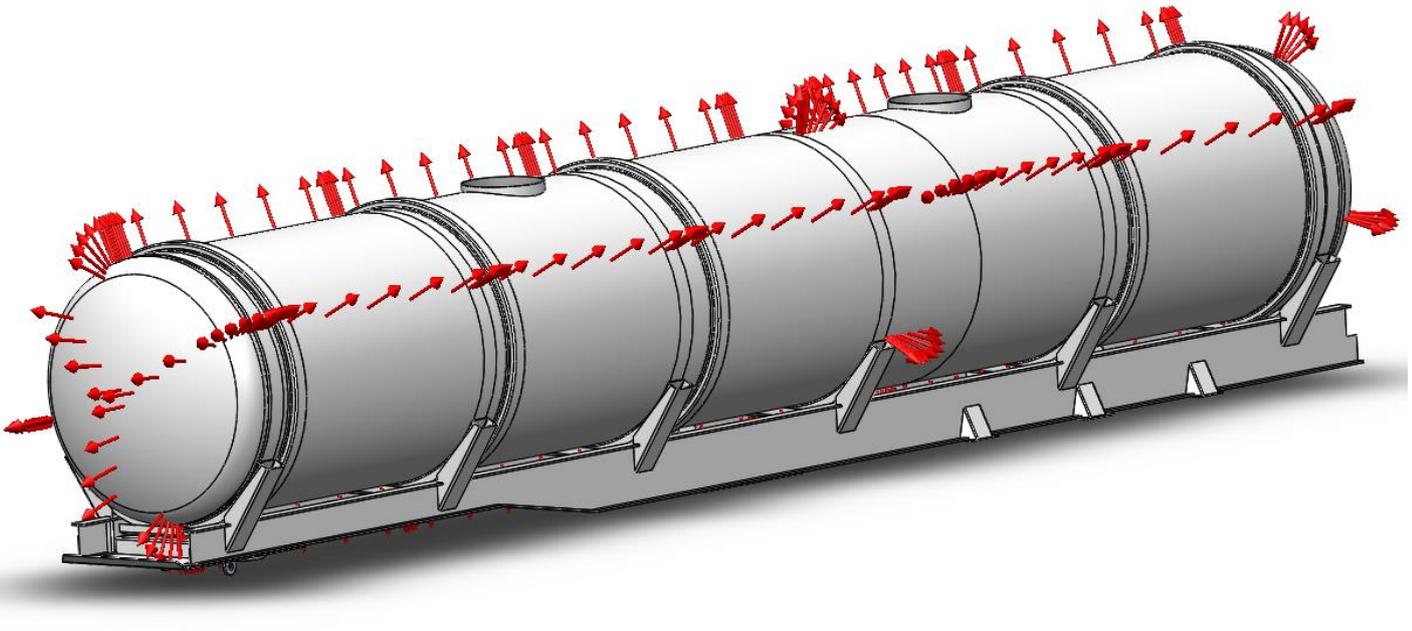


Imagen 93 – Sobrepresión interna -> Condición H.

El campo de tensiones debidas a los esfuerzos generados por la sobrepresión interna se muestra en *Imagen 94*.

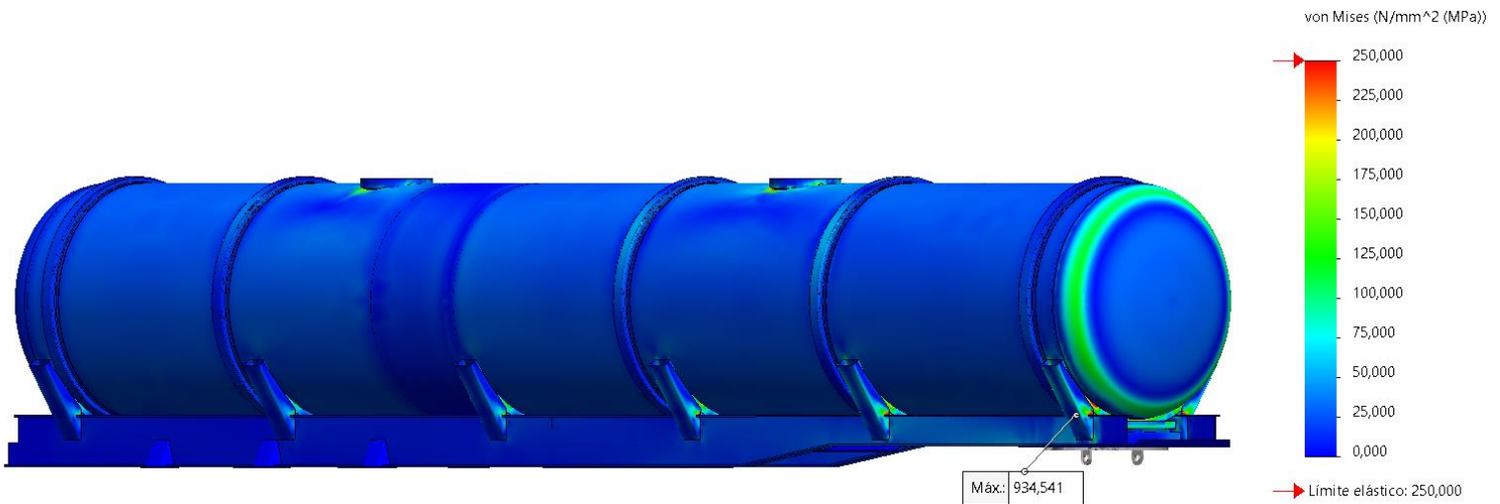


Imagen 94 – Campo de tensiones -> Condición H sobrepresión interna.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en *Imagen 95*.

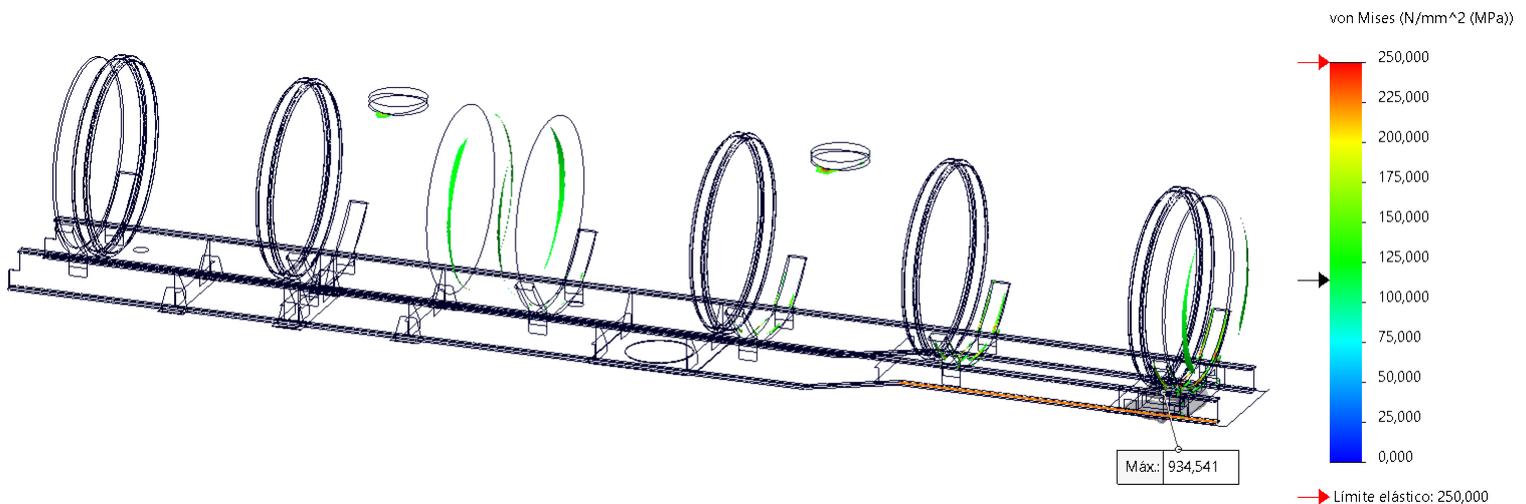


Imagen 95 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición H sobrepresión interna.

La ISO superficie anterior muestra que en zonas muy particulares apenas se supera la tensión admisible de 114MPa, pero existen puntos minúsculos de concentración de tensiones, las cuales se muestran en *Imagen 96* y se refieren a condiciones geométricas puramente, es decir, singularidades del diseño.

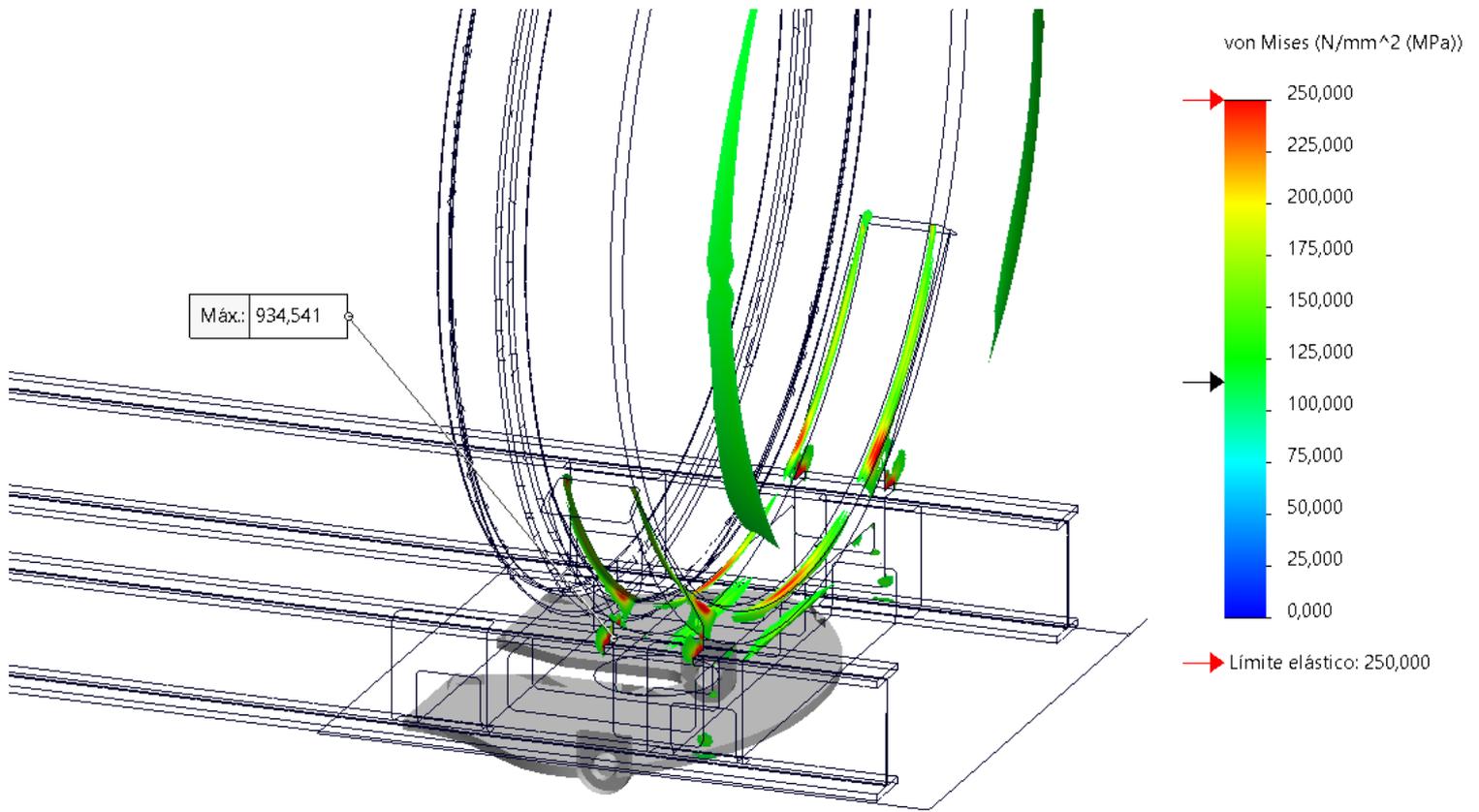


Imagen 97 – Concentración de tensiones -> Condición H sobrepresión interna.

El campo de desplazamientos se muestra en *Imagen 96*.

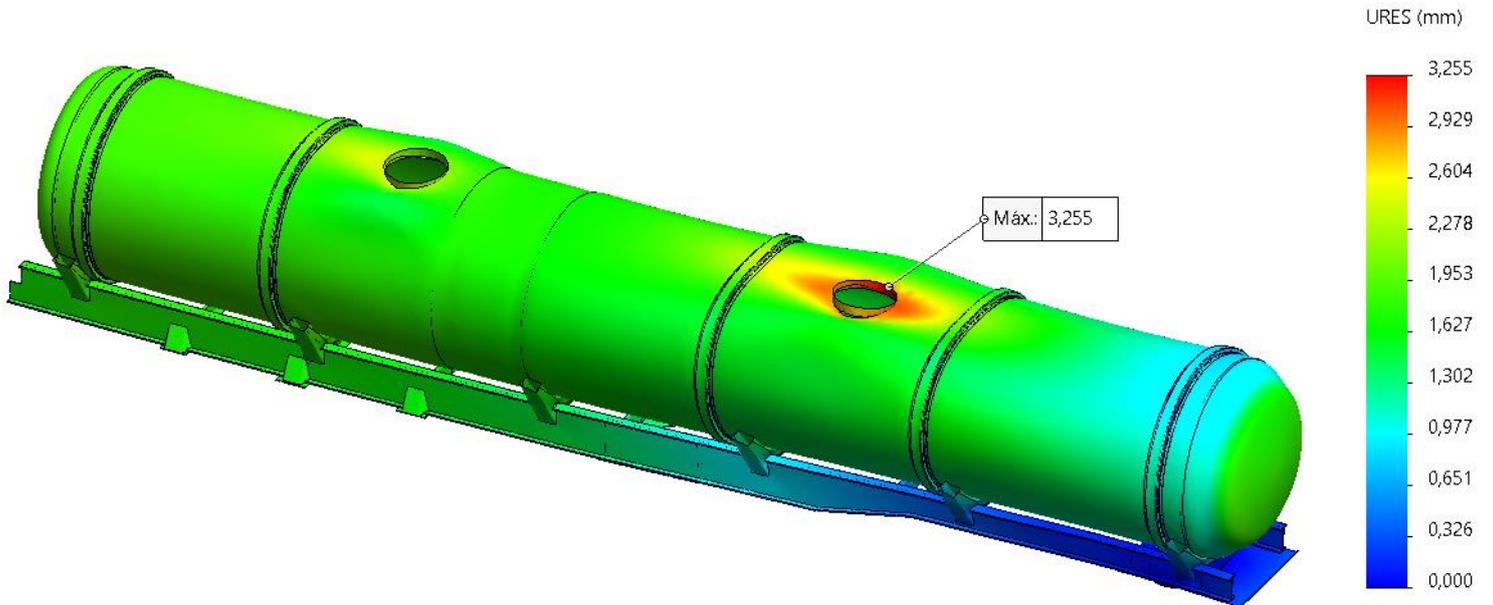


Imagen 96 – Campo de desplazamientos -> Condición H sobrepresión interna.

El trazado del factor de seguridad se muestra en *Imagen 98*.

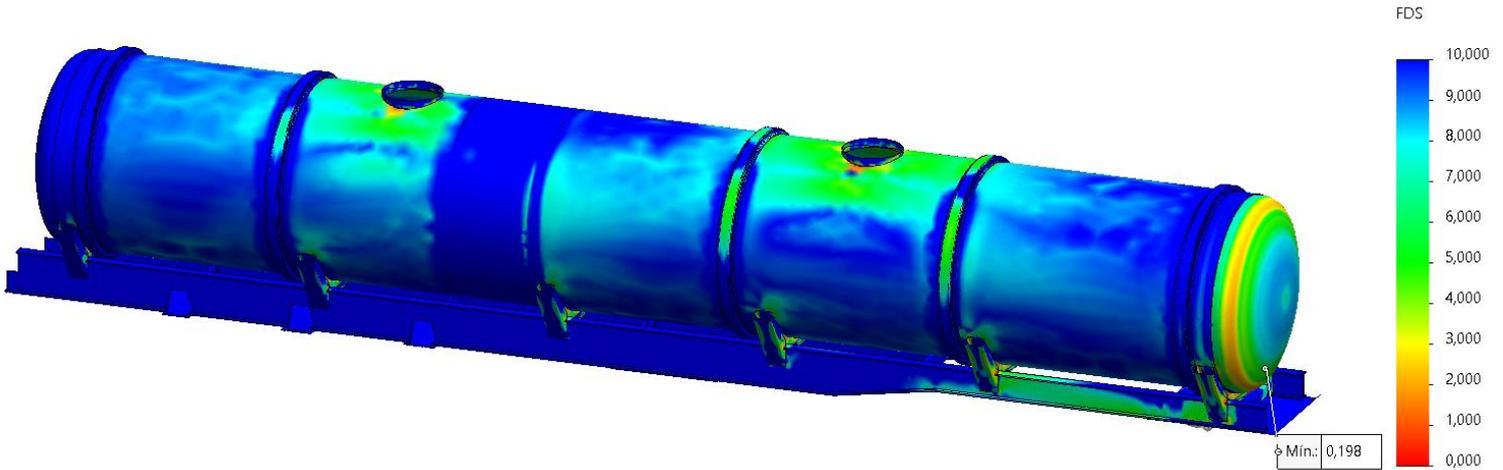


Imagen 98 – Trazado del factor de seguridad -> Condición H sobrepresión interna.

5.6.10. Condición estática I

Se somete a la cisterna a una presión externa cuyo valor resulta $0,19\text{MPa}$ como se muestra en *Imagen 99*.

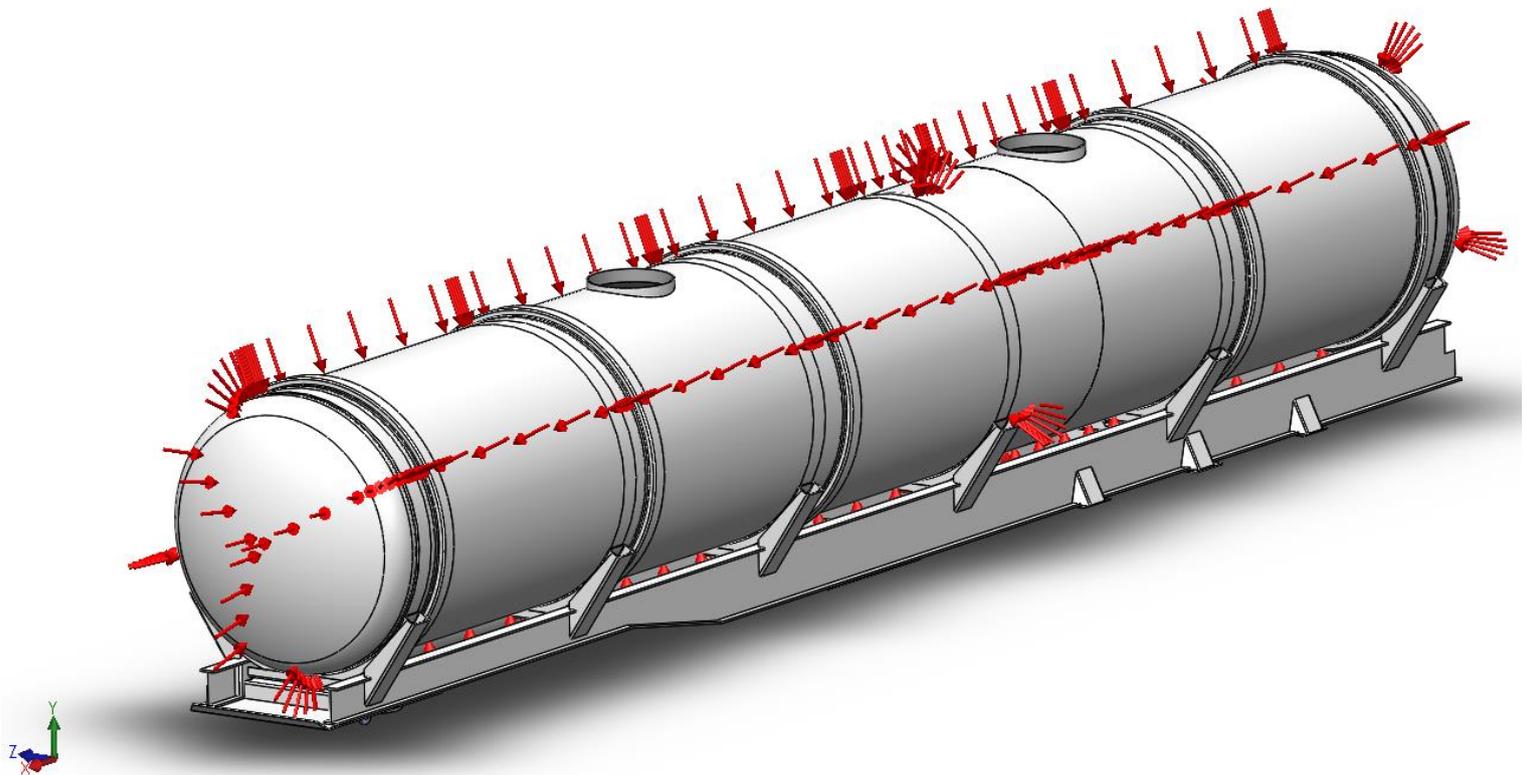


Imagen 99 – Presión externa -> Condición I.

El campo de tensiones debidas a los esfuerzos generados por la presión externa se muestra en **Imagen 100**.

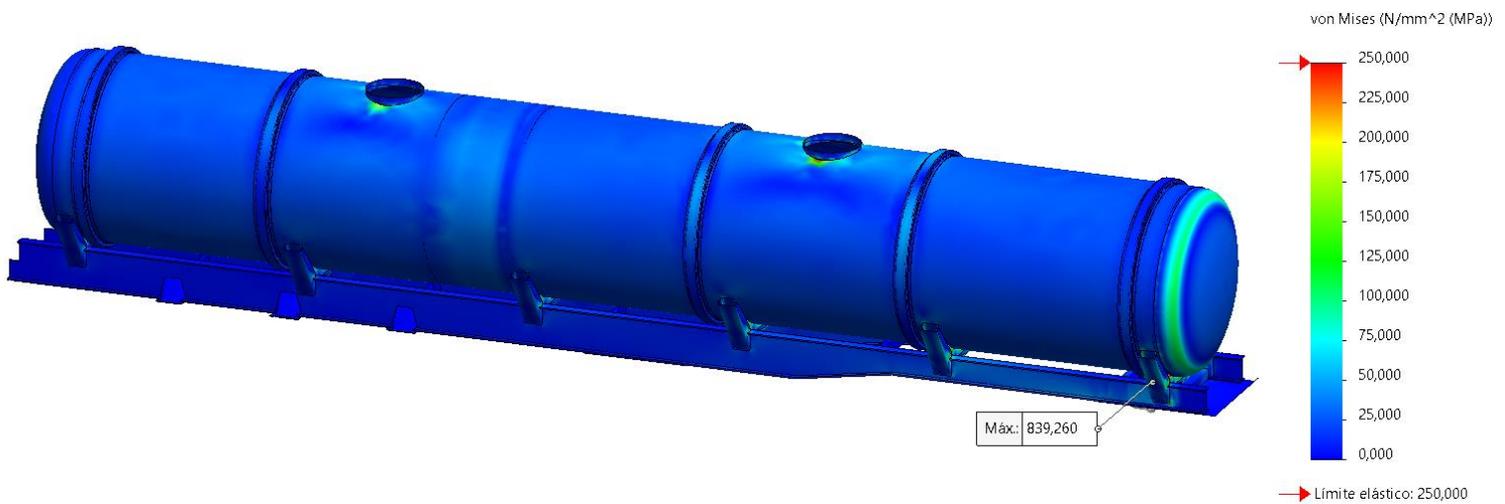


Imagen 100 – Campo de tensiones -> Condición I presión externa.

Para tener una mejor visualización de las tensiones máximas generadas y poder obtener conclusiones, se filtra una ISO superficie para valores de tensiones mayores a 114MPa como se muestra en **Imagen 101**.

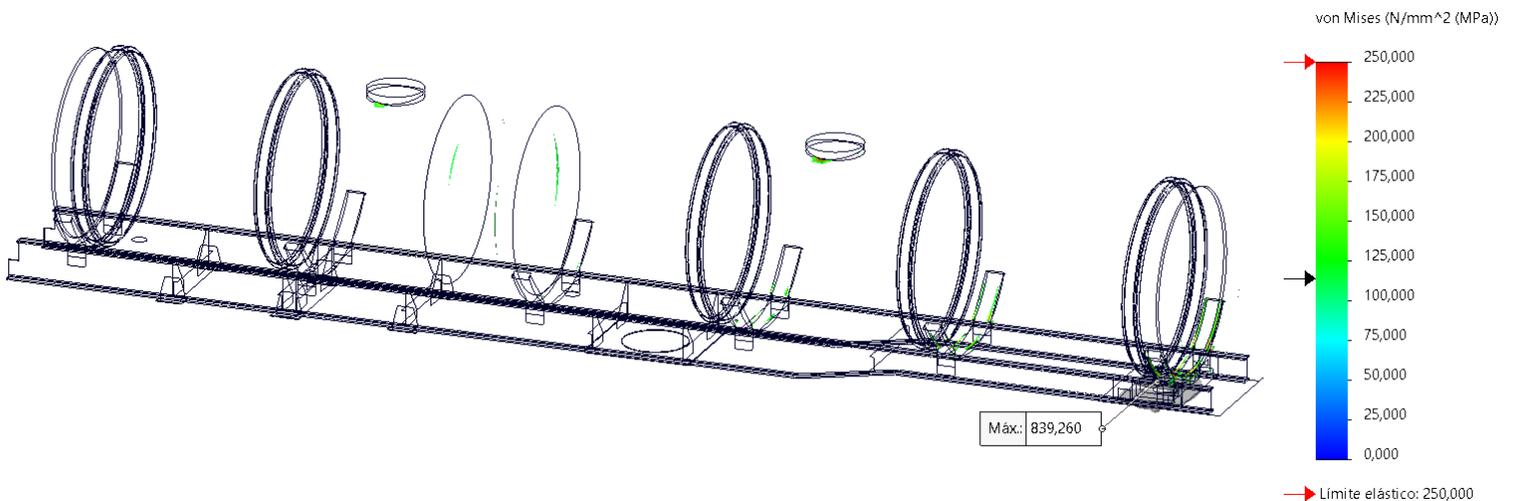


Imagen 101 – Campo de tensiones -> ISO superficie 114MPa -> Condición I presión externa.

La ISO superficie anterior muestra que en zonas muy particulares apenas se supera la tensión admisible de 114MPa, pero existen puntos minúsculos de concentración de tensiones, las cuales se muestran en **Imagen 102** y se refieren a condiciones geométricas puramente, es decir, singularidades del diseño.

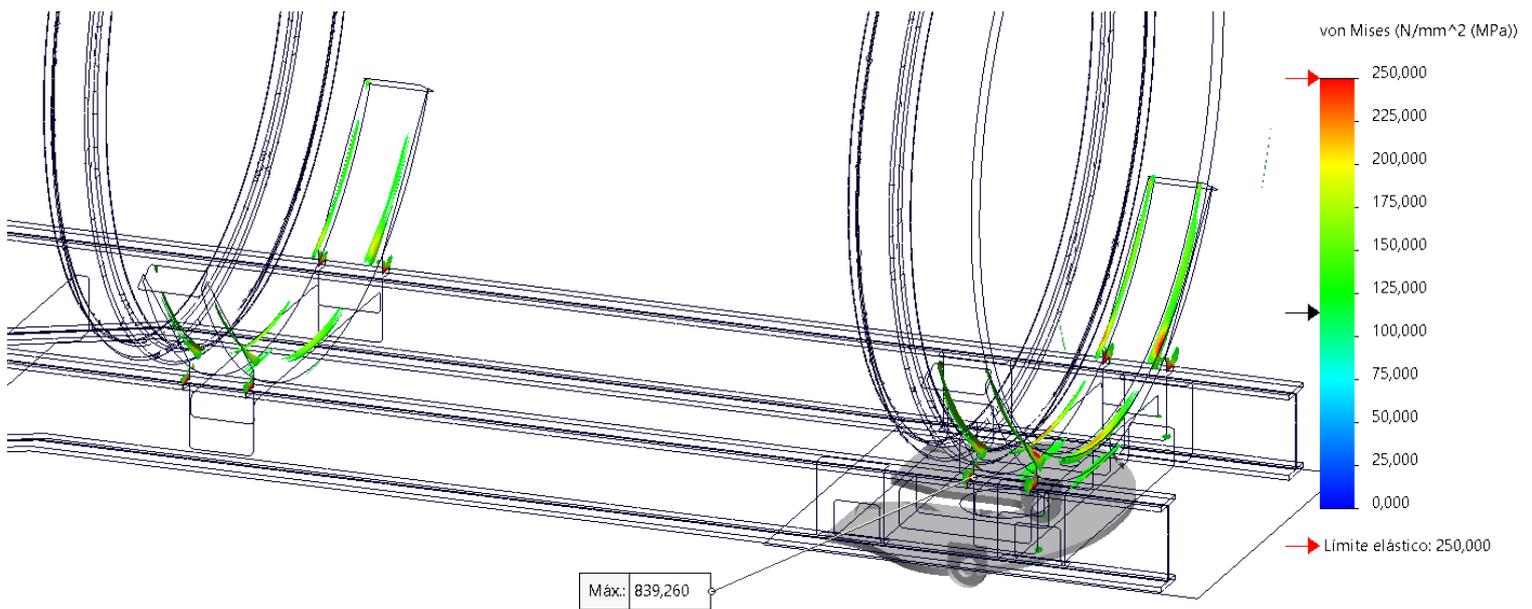


Imagen 102 – Concentración de tensiones -> Condición I presión externa.

El campo de desplazamientos obtenidos se muestra en *Imagen 103*. Los desplazamientos se encuentran mayorados por un factor de 50 veces.

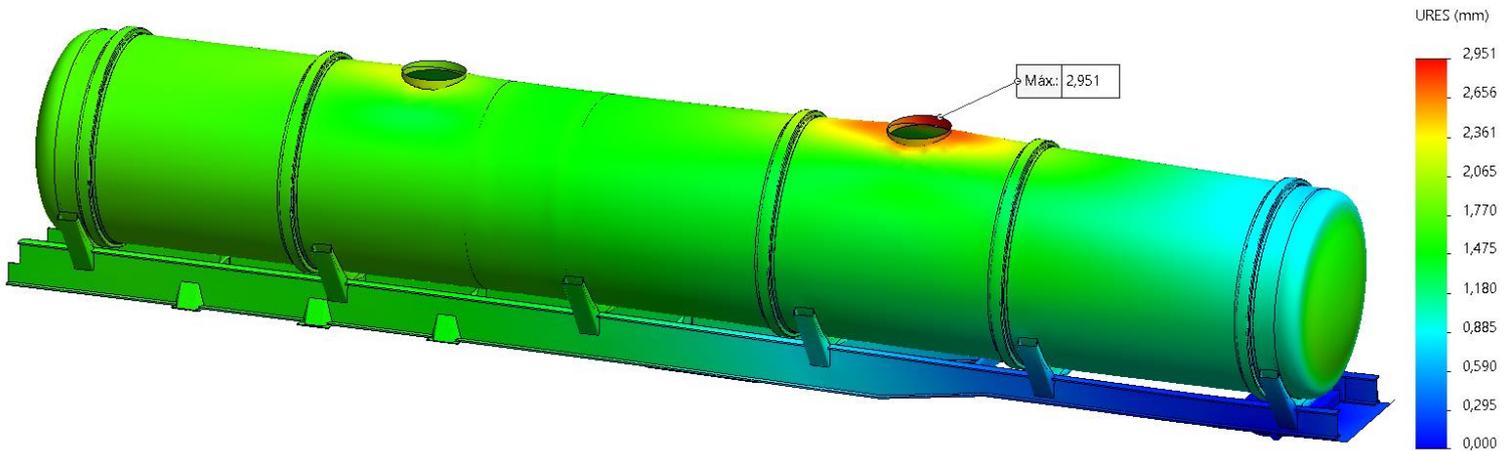


Imagen 103 – Campo de desplazamientos -> Condición I presión externa.

El trazado de factor de seguridad se muestra en **Imagen 104**.

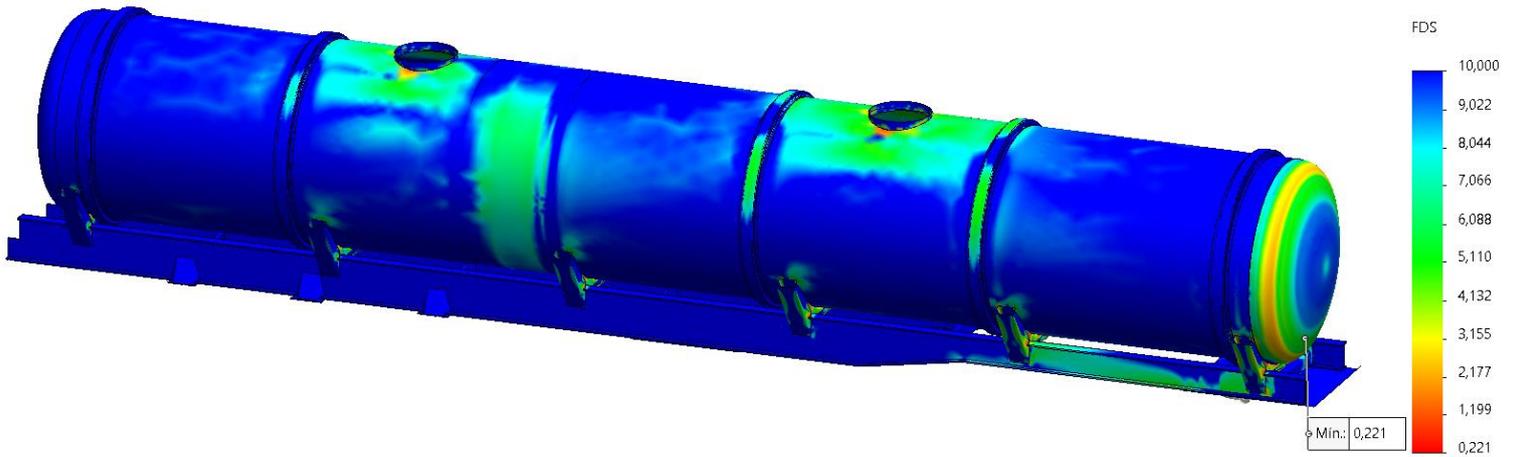


Imagen 104 – Trazado de factor de seguridad -> Condición I presión externa.

6. Conclusión

El método de elementos finitos surgió a finales de la década de los 50' con la idea de analizar las tensiones y desplazamientos generados en el fuselaje de un avión. Con el avance de la tecnología, hoy disponemos de ordenadores con los cuales se logra acelerar los procesos iterativos en los que se fundamenta el MEF. Esto permitió que la industria del diseño y fabricación de estructuras tenga una gran herramienta con la cual, de manera rápida y detallada, pueda comprender el desempeño de sus conceptos en pequeños lapsos de tiempo.

Este informe demuestra certeramente la importancia y potencialidad del método. Ahora bien, debemos comprender cuestiones inherentes a la aleatoriedad de la naturaleza. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos ejecutados no representan al 100% la realidad, es una aproximación precisa del comportamiento de la estructura bajo distintos escenarios de carga, ya que es prácticamente imposible replicar la condiciones en las que el semirremolque se desempeña a diario.

Luego de obtener los resultados podemos mencionar algunos puntos a tener en cuenta. En líneas generales, el semirremolque se desempeña de manera correcta ante las condiciones de cargas propuestas. No hay que perder de vista que los escenarios propuestos por ASME son agresivos, sin embargo, el semirremolque responde sin demasiados factores a corregir.

El lector podrá preguntarse porque existen algunas zonas donde la tensión supera el límite elástico del material. Existen dos motivos bien claros y que son propios del método. El primero es que se define que los componentes se encuentran rígidamente unidos, por lo que las tensiones generadas en las interacciones de los componentes no son representativas con lo que sucede en la realidad. Caso especial a mencionar es la idealización de unión rígida entre el planchón de enganche y la quinta rueda, restricción que elimina todo tipo de desplazamientos relativos rigidizando el modelo y generando tensiones elevadas que en la realidad no se dan. El segundo es que existen singularidades de diseño, es decir, el modelado digital permite que las aristas logren un ángulo de 90° perfecto, lo cual se sabe que es un concentrador de tensiones por excelencia, cosa que al generar las uniones soldadas estos ángulos se eliminan.

Como punto a mejorar en el diseño de la cisterna, y en base a los resultados de las Condiciones E y F, bajar el centro de gravedad del semirremolque ayudaría a completar la integridad ante cargas transversales o longitudinales. Podemos ver que, al tener un centro de gravedad alto, los momentos flectores generados son elevados y resistidos en su totalidad por la quinta rueda, tal y como se muestra en la distribución de tensiones de estas condiciones.

7. Agradecimientos

No puedo cerrar este ciclo sin antes agradecerle a todas las personas, amigos, profesores e instituciones que estuvieron presentes en todo este largo pero valioso camino.

Sin duda alguna, nada de todo esto hubiese sido posible sin el enorme e incondicional apoyo de mi familia, quienes estuvieron en los buenos momentos, pero aún más presentes en los momentos en los que uno siente que no va a poder con todo. Mención especial para ellos.

Agradezco enormemente a mi docente tutor Ing. Arrien Patricio, quien fue, además de la persona que me guío y apoyo en la última etapa de mi carrera, quien me facilitó la posibilidad de realizar mis prácticas profesionales con enfoque en una de las ramas de la ingeniería que más me apasiona.

Gracias a la empresa Tanques FANGIO S.A por abrirme sus puertas, compartirme su información y confiar en los resultados obtenidos sobre sus productos.

De más esta agradecerle a la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires y su destacado equipo docente por la gran posibilidad de formarme como Ingeniero Mecánico, durante mis 6 años de cursada me sentí muy a gusto, GRACIAS.

8. Referencias bibliográficas

8.1. Bibliografía

James M. Gere y Barry J. Goodno (2.009). *Mecánica de materiales*. CENGAGE Learnig.

Apuntes de cátedra.

8.2. Links de interés

Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI

Licencia de Configuración de Modelo – LCM.

<https://www.inti.gob.ar/areas/servicios-regulados/regulaciones-automotrices/departamento-de-regulaciones-automotrices/tramites/licencia-para-la-configuracion-de-modelo-emision> [Consulta: 25/11/2.023]

8.3. Normativas

ASME - *Rules for Construction and Continued Service of Transport Tanks* - BPVC Section XII – New York.

ASME 2.023 - *Boiler and Pressure Vessel Code An International Code – BPCV.II.D.M Section II, Part D* – New York.

IRAM/IAS U 500-42 – *Chapas de acero al carbono, laminadas en caliente, para uso estructural* – Argentina.

ADR - *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*.

9. Anexos

1. Anexo 1 – FDS-Ácido Clorhídrico