



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA DE INGENIERAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Simulación mediante elementos finitos del  
bastidor de un remolque agrícola.  
Comparativa entre elementos superficiales y  
volumétricos.

Autor:

Albino Crespo Álvarez

Tutores:

Antolín Lorenzana Ibán  
Antonio Foces Mediavilla

Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería  
del Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de  
Estructuras.

Valladolid junio 2021



# Agradecimientos

En primer lugar, este trabajo y mis estudios no serían posibles sin el apoyo de mi familia. Han estado durante todo el camino y siempre los he tenido cuando he necesitado.

A mis amigos, primero a los que he conocido en la universidad. Hemos sufrido juntos y nos hemos ayudado todo lo que hemos podido.

A mis amigos de infancia, siempre han estado para todo, aunque no entiendan lo que suponga hacer una ingeniería.

Por último, tengo que agradecer a Antolín por haberme guiado y ayudado durante todo este proceso que es hacer un TFG.



# Resumen

Este trabajo consiste en el análisis de una estructura real que se monta en vehículos arrastrados. La estructura es el chasis de un remolque agrícola.

Se busca obtener la mayor información posible sobre la estructura para poder mejorarla y optimizarla. De manera que se pueda buscar la mejor combinación entre ligereza y resistencia.

Toda mejora y desarrollo del chasis debe cumplir con la normativa vigente en el país donde vaya a circular el vehículo. Estos cambios no pueden reducir ni quitar la seguridad e integridad del remolque.

Para el desarrollo de este TFG se ha empleado íntegramente el programa SolidWorks. Programa que se usa para el diseño de estos vehículos en el ámbito profesional. Este trabajo explorará la mejor manera de estudiar ensayos simulados de análisis estático y pandeo.

Palabras clave: chasis, SolidWorks, análisis estático, pandeo



Figura 1: Foto de dos remolques agrícolas terminados

*This work is about the analysis of a real structure mounted on towed vehicles. This structure is the chassis of an agricultural trailer.*

*The goal is to get as much information as possible about the structure in order to improve and optimize it. As a result, we can find the best combination between lightness and resistance.*

*Any improvement and development of the chassis must comply with the current regulations of the country where the vehicle is going to circulate. These changes cannot reduce or remove the safety and integrity of the trailer.*

*During development of this thesis, SolidWorks program has been used entirely. This program is typically used in the industry for the professional design of these vehicles. This paper will explore the best way to study buckling and static analysis simulated tests.*

*Keywords: chassis, SolidWorks, static analysis, buckling*

# Índice

01. Resumen.....	5
02. Introducción, motivación y objetivos.....	11
03. Antecedentes.....	15
04. Descripción de la estructura.....	19
05. Verificaciones.....	23
06. Modelado del empuje.....	41
07. Ensayos sobre la estructura.....	45
08. Comparativa entre ensayos.....	65
09. Conclusiones.....	71
10. Bibliografía.....	75

FIGURA 1: FOTO DE DOS REMOLQUES AGRÍCOLAS TERMINADOS .....	5
FIGURA 2: VISIÓN GENERAL DE UN EMPUJE .....	11
FIGURA 3: EMPUJE CON PUERTA.....	11
FIGURA 4: EMPUJE CON MOLINETE .....	12
FIGURA 5: BAÑERA CÓNICA .....	15
FIGURA 6: REMOLQUE DE CARTOLAS .....	15
FIGURA 7: DETALLE DE UNA PUERTA MONTADA EN UN EMPUJE .....	16
FIGURA 8: DETALLE DE UN ESPARCIDOR MONTADO EN UN EMPUJE .....	16
FIGURA 9: VISTA LATERAL DE UN EMPUJE .....	17
FIGURA 10: DETALLE DE RUEDAS DE FLOTACIÓN MONTADAS EN UN EMPUJE.....	17
FIGURA 11: DETALLE DE UN CHASIS TERMINADO .....	19
FIGURA 12: DETALLE DE LA LANZA DE UN REMOLQUE .....	20
FIGURA 13: DETALLE DE UN PLANO DE UN CHASIS DE UN EMPUJE VISTA LATERAL.....	20
FIGURA 14: DETALLE DE UN PLANO DE UN CHASIS DE UN EMPUJE VISTA SUPERIOR .....	21
FIGURA 15: DETALLE DEL VOLADIZO LATERAL DE UN EMPUJE .....	21
FIGURA 16: DETALLE DEL MODELO 3D, CHASIS ANCHO.....	22
FIGURA 17: DETALLE DEL MODELO 3D, CHASIS ESTRECHO.....	22
FIGURA 18: ENUNCIADO DEL PROBLEMA EN 3D .....	23
FIGURA 19: ECUACIONES PARA RESOLVER EL PROBLEMA.....	23
FIGURA 20: TABLA DE DATOS DE LAS VIGAS IPE .....	24
FIGURA 21: CROQUIS DE LA IPE EN MODELO SUPERFICIAL.....	25
FIGURA 22: EXTRUSIÓN DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	25
FIGURA 23: CROQUIS DE LA IPE EN MODELO VOLUMÉTRICO.....	26
FIGURA 24: EXTRUSIÓN DE LA VIGA EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	26
FIGURA 25: ELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO .....	27
FIGURA 26: DETALLE DEL APOYO DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO.....	27
FIGURA 27: DETALLE DE LA CARGA EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	28
FIGURA 28: DETALLE DE LA MALLA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO .....	28
FIGURA 29: MALLA FINALIZADA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO .....	29
FIGURA 30: DETALLE DE MALLA.....	29
FIGURA 31: RESULTADOS DE REPARTO DE CARGAS DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO ....	30
FIGURA 32: RESULTADO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO...	30
FIGURA 33: PRIMER RESULTADO DE PANDEO DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO .....	31
FIGURA 34: CAMBIO DEL NÚMERO DE FORMAS DE PANDEO DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO.....	31
FIGURA 35: FORMA MODAL 1 DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO.....	32
FIGURA 36: FORMA MODAL 2 DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO.....	32
FIGURA 37: FORMA MODAL 3 DE LA VIGA EN EL MODELO VOLUMÉTRICO.....	32
FIGURA 38: MATERIAL Y ESPESOR DE LAS SUPERFICIES DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL ....	33
FIGURA 39: DETALLE DEL ESPESOR DEL ALMA DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL.....	33
FIGURA 40: DETALLE DEL ESPESOR DEL ALA DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	33
FIGURA 41: DEFINICIÓN DE LA UNIÓN ENTRE SUPERFICIES DE LA VIGA.....	34
FIGURA 42: DEFINICIÓN DEL EMPOTRAMIENTO DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	34
FIGURA 43: DEFINICIÓN DE LA CARGA DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	34
FIGURA 44: DEFINICIÓN DE LA MALLA DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL.....	35
FIGURA 45: MALLA DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	35
FIGURA 46: REPARTO DE CARAS DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL.....	36
FIGURA 47: DESPLAZAMIENTOS DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	37
FIGURA 48: PRIMER RESULTADO DE PANDEO DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL.....	37
FIGURA 49: CAMBIO A 3 FORMAS DE PANDEO DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	38
FIGURA 50: FORMA MODAL 1 DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	38
FIGURA 51: FORMA MODAL 2 DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	38
FIGURA 52 :FORMA MODAL 3 DE LA VIGA EN MODELO SUPERFICIAL .....	39
FIGURA 53: COMPARATIVA DEL REPARTO DE CARGAS DE LAS VIGAS .....	39
FIGURA 54: COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE LAS VIGAS.....	40
FIGURA 55: IMAGEN DE UN TUBO EN MODELO VOLUMÉTRICO.....	41
FIGURA 56: IMAGEN DE UNA VIGA EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	41

FIGURA 57: IMAGEN DE UNA PIEZA PLEGADA EN MODELO VOLUMÉTRICO EN 3D .....	41
FIGURA 58: IMAGEN DEL MONTAJE DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	42
FIGURA 59: IMAGEN DEL CHASIS CON LAS LANZA EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	42
FIGURA 60: IMAGEN DE LA MISMA PIEZA EN MODELO VOLUMÉTRICO Y SUPERFICIAL.....	42
FIGURA 61: VISTA LATERAL DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	43
FIGURA 62: VISTA DE UN DETALLE DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	43
FIGURA 63: VISTA GENERAL DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL .....	43
FIGURA 64: CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	44
FIGURA 65: CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	44
FIGURA 66: SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LAS PIEZAS EN MODELO VOLUMÉTRICO.....	45
FIGURA 67: DEFINICIÓN DE LA UNIÓN ENTRE PIEZAS.....	45
FIGURA 68: DETALLE DE UNIÓN TIPO BULÓN ENTRE PIEZAS .....	46
FIGURA 69: DEFINICIÓN DEL APOYO DE LA LANZA .....	46
FIGURA 70: DEFINICIÓN DEL APOYO DE LA SUSPENSIÓN.....	47
FIGURA 71: DEFINICIÓN DE LA CARGA.....	47
FIGURA 72: MALLA DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO.....	48
FIGURA 73: DEFINICIÓN DE LA MALLA.....	48
FIGURA 74: ANÁLISIS DE LAS LIBERTADES DE LAS PIEZAS DEL CHASIS .....	49
FIGURA 75: MENSAJE DE CONFIRMACIÓN DE QUE EL CHASIS NO TIENEN PIEZAS CON LIBERTADES .....	49
FIGURA 76: DETALLE DEL AJUSTE DE LOS ENCAJES EN 3D .....	49
FIGURA 77: DEFINICIÓN DE LA UNIÓN ENTRE DOS CARAS SEPARADAS.....	50
FIGURA 78: REPARTO DE CARGAS DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	50
FIGURA 79: DESPLAZAMIENTOS DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	51
FIGURA 80: FACTOR DE SEGURIDAD DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	51
FIGURA 81: FORMA MODAL 1 DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	52
FIGURA 82: FORMA MODAL 2 DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	52
FIGURA 83: FORMA MODAL 3 DEL CHASIS EN MODELO VOLUMÉTRICO .....	53
FIGURA 84: VISTA GENERAL DEL MONTAJE DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	54
FIGURA 85: DEFINICIÓN DEL MATERIAL DE LAS PIEZAS DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	54
FIGURA 86: DEFINICIÓN DEL ESPESOR DE LAS PIEZAS DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	55
FIGURA 87: DEFINICIÓN DEL ESPESOR DE UN TUBO EN MODELO SUPERFICIAL.....	55
FIGURA 88: DEFINICIÓN DE LA UNIÓN ENTRE PIEZAS EN CONTACTO EN MODELO SUPERFICIAL .....	56
FIGURA 89: DEFINICIÓN DE LAS UNIONES TIPO BULÓN EN MODELO SUPERFICIAL .....	56
FIGURA 90: DEFINICIÓN DEL APOYO DE LA LANZA EN MODELO SUPERFICIAL.....	57
FIGURA 91: DEFINICIÓN DEL APOYO QUE SIMULA LA SUSPENSIÓN EN MODELO SUPERFICIAL .....	57
FIGURA 92: DEFINICIÓN DE LAS CARGAS DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL .....	58
FIGURA 93: CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO EN MODELO SUPERFICIAL .....	58
FIGURA 94: MALLA DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	58
FIGURA 95: ANÁLISIS DE PIEZAS CON LIBERTADES EN EL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL .....	59
FIGURA 96: REPARTO DE CARGAS DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	59
FIGURA 97: DESPLAZAMIENTOS DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	60
FIGURA 98: FACTOR DE SEGURIDAD DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	60
FIGURA 99: FORMA MODAL 1 DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	61
FIGURA 100: FORMA MODAL 2 DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	61
FIGURA 101: FORMA MODAL 3 DEL CHASIS EN MODELO SUPERFICIAL.....	61
FIGURA 102: DETALLE DEL AJUSTE ENTRE UNA IPE Y UNA UPN .....	64
FIGURA 103: DEFINICIÓN DE UNIÓN ENTRE CARAS QUE NO ESTÁN EN CONTACTO.....	65
FIGURA 104: DETALLE DE DISEÑO EN MODELO SUPERFICIAL .....	65
FIGURA 106: COMPARATIVA DE LAS CARGAS EN LOS MODELOS.....	67
FIGURA 108: COMPARATIVA DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN LOS MODELOS .....	67
FIGURA 109: COMPARATIVA DE LOS FACTORES DE CARGA.....	68
FIGURA 110: ZONAS DE PANDEO DEL MODELO VOLUMÉTRICO.....	68
FIGURA 111: ZONAS DE PANDEO DEL MODELO SUPERFICIAL .....	68
FIGURA 112: VISTA DETALLE DEL ANCLAJE DE LA LANZA.....	71
FIGURA 113: DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA.....	71
FIGURA 114: VISTA DETALLE DEL PANDEO DE LA ESTRUCTURA.....	71



# Introducción, motivación y objetivos

## 2.1 Introducción y motivación

El chasis que se va a analizar pertenece a un vehículo arrastrado agrícola. Estos vehículos se denominan “empujes” o “expulser”. Este tipo de remolques poseen un doble piso impulsado por un sistema hidráulico. Por lo que la carga se va desplazando hacia atrás para la descarga.



Figura 2: Visión general de un Empuje

La carga se puede desplazar con el vehículo estático o en movimiento. El hecho de que el vehículo desplace la carga en movimiento hace que el diseño del chasis sea más exigente, pues se pueden dar momentos puntuales por las irregularidades del terreno en los que todo el peso se puede concentrar en una zona concreta del vehículo.

Este tipo de remolques están formados por partes o módulos desmontables e intercambiables. Esta variedad de cargas sobre el remolque añade aún más exigencia al chasis. Los principales módulos intercambiables son una puerta para transportar carga y el otro es un molinete o espirales para esparcir abono sobre el terreno.

La puerta en los empujes es una extensión del mismo. Aumenta los metros cúbicos de carga que puede llevar. Sólo se utiliza para transporte. Hay varios tipos de puertas en función de la carga que vaya a llevar el remolque.



Figura 3: Empuje con Puerta

El molinete es un módulo que se ancla en la parte trasera, donde antes estaba la puerta. Consta de dos espirales que giran a gran velocidad. Su funcionalidad consiste en esparcir abono en las tierras de cultivo.



*Figura 4: Empuje con Molinete*

Este módulo es muy pesado y voluminoso, por lo que las puertas que se montan en estos vehículos son tan grandes como para que el remolque sea del mismo tamaño con ambos módulos. Además, el hecho de hacer puertas grandes hace que pesen más cuando están cargadas, de esta manera el remolque lleva casi la misma carga anclada a la parte posterior de vehículo.

El vehículo ha de ser resistente y ligero al mismo tiempo. Esta versatilidad y combinación de factores hace que la estructura de chasis sea crítica para un funcionamiento correcto y duradero del vehículo.

En esta empresa se rediseña, la inmensa mayoría de las veces, en función de la experiencia y de roturas o fallos que se hayan dado. Por lo que el análisis de estos vehículos puede dar mucha información, para así evitar sobredimensionar sistemáticamente. Uno de los objetivos de este trabajo es aprender a aprovechar este tipo de herramientas para mejorar el diseño y eficiencia de los vehículos.

Con el paso del tiempo, el usuario de estos vehículos ha ido cambiando a remolques más grandes para poder llevar más carga en un solo trayecto. Ahora mismo se fabrica para llevar la máxima carga legal arrastrada que es de 24 toneladas, según el reglamento europeo [1]. Aunque en la realidad se carga el remolque al máximo de su capacidad volumétrica, llegando a 30 toneladas en algunos casos.

Las tensiones a las que se somete a este tipo de vehículos son muy altas ya que no sólo es el elevado peso y el movimiento de la carga. El terreno sobre el que suelen circular es muy irregular, lleno de baches, cantos y demás defectos del suelo. Se dan momentos puntuales en los que todo el peso del remolque puede apoyarse en una sola rueda.

## 2.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es conseguir encontrar los puntos más débiles del remolque para en un futuro poder mejorar el chasis y encontrar el equilibrio entre resistencia y ligereza.

Como se trabaja con el límite legal de carga arrastrada por un vehículo, cuanto menos pese el remolque, más carga se puede llevar dentro.

También se puede rediseñar algunas piezas para obtener un comportamiento más óptimo, o simplemente un cambio estético siendo consciente de que el nuevo diseño sea válido en tanto que no sólo cumpla los requerimientos normativos y funcionales si no que facilite su fabricación, sea más fácil de ensamblar en el conjunto o simplemente abarate costes.

El objetivo principal es el aprendizaje y utilidad el módulo de análisis de estructuras del SolidWorks para utilizarlo en el ámbito profesional. Tanto en modelo volumétrico como en superficial.

Otro objetivo es tener el máximo conocimiento sobre la estructura para poder extraerla a otros materiales más livianos.

En resumen, los objetivos de este trabajo son:

- a) Aprender a usar el módulo de análisis de estructuras de SolidWorks.
- b) Analizar y comparar la estructura diseñada en modelo volumétrico y superficial.
- c) Obtener la mayor información posible sobre la estructura, como puntos débiles, de máxima tensión o críticos.



## Antecedentes

La historia del desarrollo de este tipo de vehículos es relativamente reciente. Al principio eran vehículos más pequeños. El sistema de expulsión era más simple y menos óptimo. Se fabricaban chasis basándose en otros vehículos agrícolas, como por ejemplo en una bañera, que se puede observar en la Figura 5.



Figura 5: Bañera Cónica

Las bañeras son la evolución natural al remolque clásico de cartolas, figura 6. Es un vehículo cuyo objetivo es el de transportar una carga. Para la descarga, la bañera dispone de una puerta trasera con accionamiento hidráulico y una basculación de toda la caja.



Figura 6: Remolque de cartolas

El mayor defecto de este tipo de vehículos, que es lo que ha propiciado la creación del remolque que se está analizando, es que cada vez son bañeras más grandes. En los últimos años el agricultor empieza a demandar más capacidad de carga y esto hace que las bañeras sean de mayores dimensiones. El principal problema es que cuanto más larga es una bañera, más altura alcanza durante la basculación. La estabilidad de una bañera de dimensiones importantes, de hasta 10 metros de longitud de caja, basculada en un suelo irregular se reduce hasta tal punto de peligrosidad.

Otro defecto que tiene la bañera es, como ya se ha dicho antes, que sólo sirve para el transporte. La agricultura evoluciona y el agricultor necesita de una mayor variedad de vehículos para poder realizar tu trabajo.

De esta combinación de factores nace el empuje. No necesita bascular, ya que descarga mediante el sistema de empuje o “expulser”, y puede intercambiar su módulo trasero. Por lo que puede hacer las veces de dos vehículos a la vez.

Con el paso del tiempo se va gestando lo que termina siendo un empuje. Los vehículos empiezan a montar módulos intercambiables traseros. En la Figura 6 se puede ver un empuje con una puerta como módulo trasero. Y en la Figura 7 se ve un molinete como módulo.



Figura 7: Detalle de una puerta montada en un Empuje



Figura 8: Detalle de un Esparcidor montado en un Empuje

Como ya se ha mencionado anteriormente, los usuarios empezaban a solicitar vehículos más grandes. Por lo que la estructura tenía que volverse más resistente. En la Figura 8 se ve un vehículo de dimensiones importantes. Ahora mismo se fabrica hasta el máximo legal permitido según el reglamento europeo [1], que es de 12 metros desde la punta del enganche hasta el punto más retrasado del vehículo. En la Figura 8 se puede ver un remolque de estas dimensiones.



Figura 9: Vista Lateral de un Empuje

En la actualidad el vehículo medio que se fabrica es de unas dimensiones importantes y con el añadido de ruedas de flotación. Las ruedas de flotación son más grandes en cuanto a diámetro y anchura. Este tipo de ruedas se montan en vehículos que van a trabajar en terrenos blandos. Se busca que el remolque reparta la carga en más superficie y, de esta manera, castigar menos el terreno a que se está trabajando.



Figura 10: Detalle de Ruedas de Flotación montadas en un Empuje

Al tener una mayor superficie de apoyo, las ruedas de flotación reparten la carga del remolque sobre el terreno. De esta manera, el vehículo tiene menos posibilidades de quedarse atascado y reducen el daño que pueden producir al rodar sobre la tierra en el cultivo.

Estas ruedas tienen por parte negativa un mayor rozamiento, se requiere más energía para que la rueda supere un obstáculo. Al ser ruedas tan grandes hacen mucha palanca al chasis, al tirar del remolque.

Esta combinación entre remolques grandes y ruedas de flotación hace que los chasis sufran una alta concentración de cargas. El avance de los vehículos originales hasta los actuales se ha producido en un “corto” periodo de tiempo. Por lo que el desarrollo no está muy optimizado.

## Descripción de la estructura

El objetivo, como ya se ha visto, a la hora de diseñar el chasis de un empuje agrícola es que sea resistente y ligero a la vez. Son vehículos que van a cargar mucho peso y a circular por terrenos muy irregulares.

La estructura que conforma el chasis tiene como objetivo concentrar todos los esfuerzos en las vigas principales donde se suelda la suspensión. Como se puede observar en las figuras 11 y 13, las vigas recorren toda la estructura desde el inicio hasta el final.



*Figura 11: Detalle de un Chasis terminado*

Estas vigas se posicionarán entre las ruedas, por lo que, según sea el vehículo, pueden tener más vuelo o menos hacia los laterales del vehículo. En la Figura 11 se puede apreciar como las vigas y la suspensión va entre las ruedas y ancla a los ejes.

Por ejemplo, si se va a fabricar un remolque que va a llevar ruedas pequeñas y estrechas, se podrán separar estas vigas, de tal forma que el vehículo posee un ancho de vigas mayor y favorece el reparto de cargas. Sin embargo, en la actualidad es muy común montar ruedas de flotación, siendo estas de una anchura y diámetro mayor. Estos últimos casos obligan a reducir el ancho de vigas ya que la normativa de circulación del reglamento europeo [1] nos impide superar los 2,55 m de anchura. Estos son los casos más críticos.

La estructura tiene que transmitir todos los esfuerzos hacia la suspensión y la lanza, que están directamente ancladas a las vigas principales. La lanza de un remolque es la parte del vehículo arrastrado que se une con la maquina tractora, como se puede ver en la figura 12. En la figura 13 se puede observar la distribución de las ruedas en un chasis.



Figura 12: Detalle de la lanza de un remolque

La posición del centro de ejes es crucial. Esta demarcará la carga que se apoyará en el enganche del tractor. La normativa nos dice que esta carga nunca debe superar los 3000 kg. Hacer que la carga sobre el enganche sea muy baja o incluso negativa nos perjudicaría en el sentido de que el tractor perdería mucha tracción y dificultaría la agilidad a la hora de moverse.

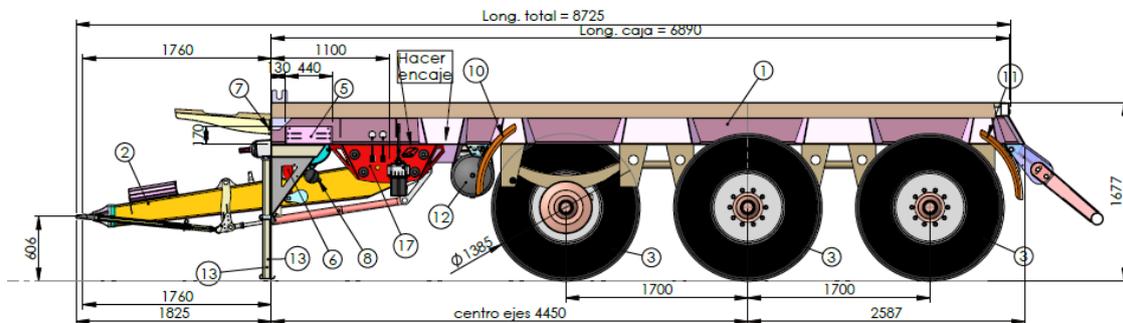


Figura 13: Detalle de un plano de un chasis de un empuje vista lateral

Encima de estas vigas principales hay un conjunto de tubos y perfiles que sirven para posicionar el piso del remolque, donde va a estar la carga.

Como se puede observar en la figura 14, la parte superior del chasis es una estructura que consiste en perfiles situados en sentido perpendicular a las vigas. Sobre estos irán otros perfiles en sentido longitudinal sobre el que irá el piso del remolque y sobre este la carga.

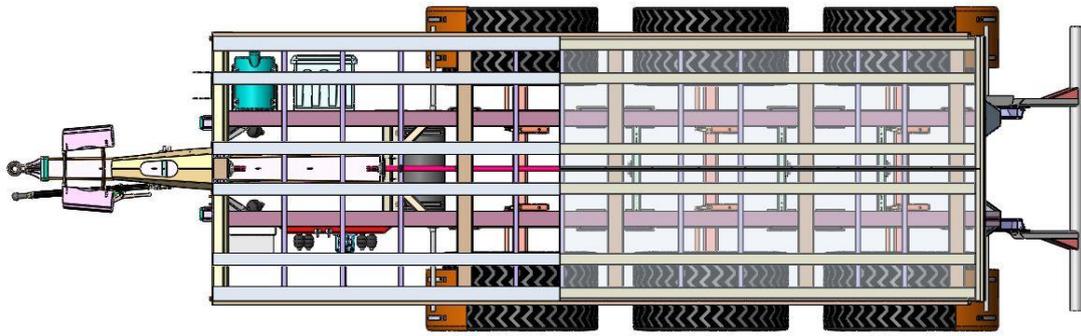


Figura 14: Detalle de un plano de un chasis de un empuje vista superior

Como ya se ha mencionado antes, el principal problema es el voladizo lateral que se genera entre la estructura superior y las vigas principales.

En la figura 15 se puede observar un claro ejemplo de un gran voladizo. La distancia entre el exterior de la viga principal y el lateral de la caja es importante. En el caso que se puede ver en la figura 15 es mucho más crítico, ya que este remolque posee una caja desmontable. La caja y el chasis son estructuras independientes, por lo que no se pueden soldar entre sí ni añadir refuerzos laterales para mejorar la resistencia a la carga de la caja.



Figura 15: Detalle del voladizo lateral de un empuje

Este es uno de los puntos más críticos a la hora de diseñar un remolque. Este voladizo con ruedas de flotación será mucho mayor que si fuera a montar ruedas más convencionales o de carretera. En las Figuras 16 y 17 de pueden ver las notables diferencias entre montar un chasis ancho y uno estrecho.

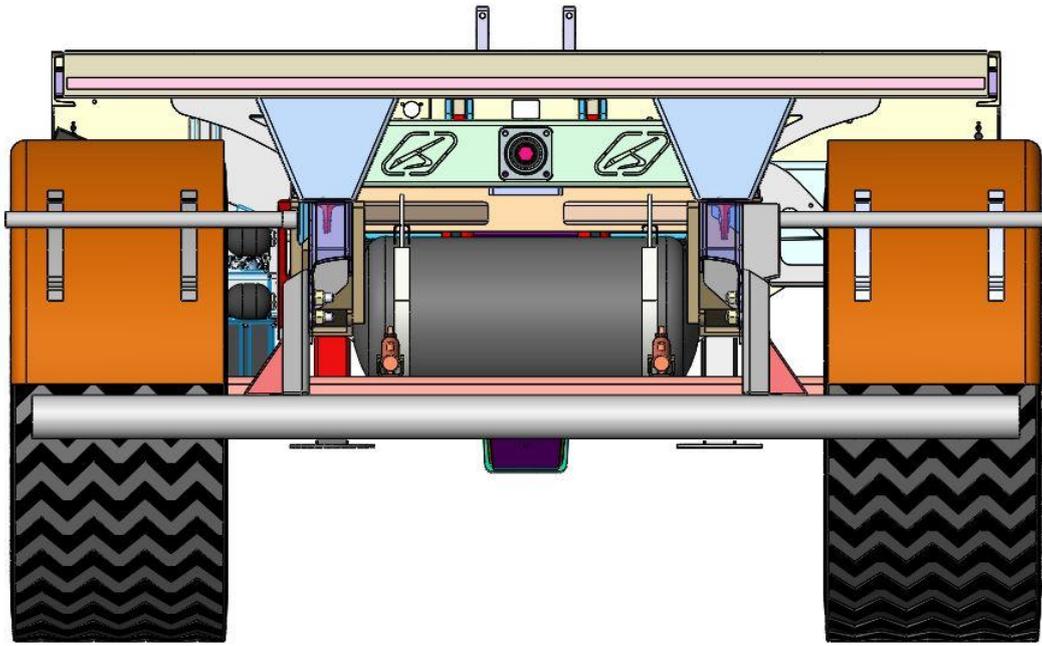


Figura 16: Detalle del modelo 3D, chasis ancho

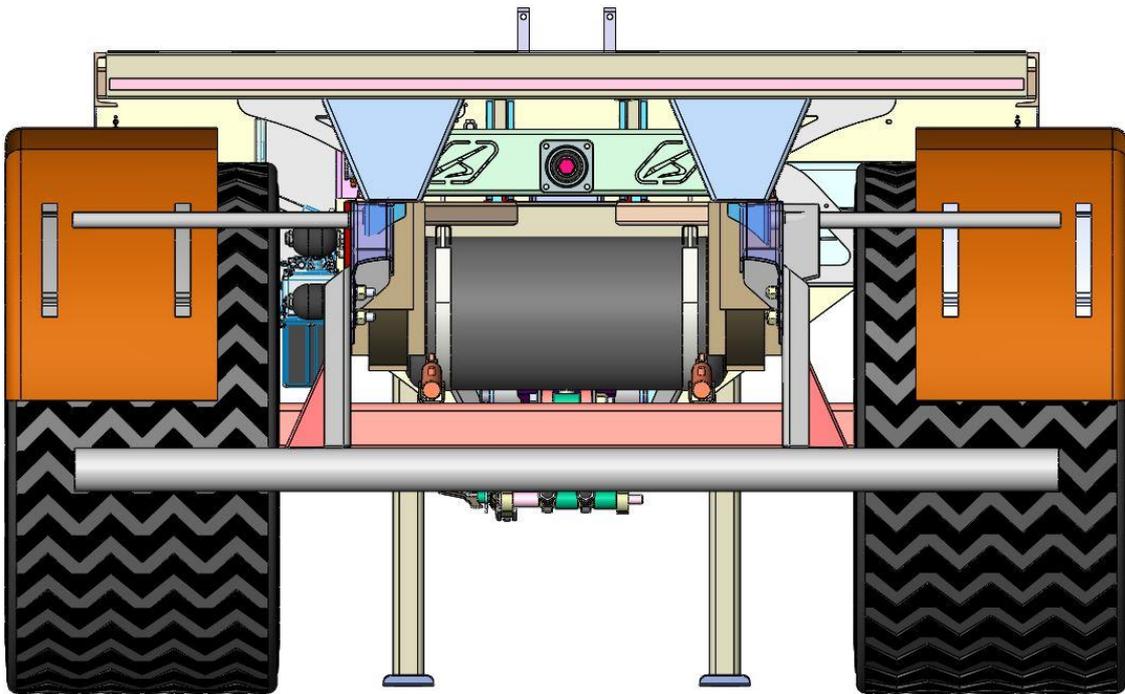


Figura 17: Detalle del modelo 3D, chasis estrecho

# Verificaciones

Antes de comenzar a analizar la estructura se comprueba que con el software se consiguen los resultados esperados para problemas sencillos, de manera que se pueda confiar en las soluciones que nos pueda dar para problemas más complicados.

Para ello se realiza un problema sencillo con una viga empotrada en uno de sus extremos y una carga continua aplicada. Este problema se basa en los métodos matemáticos que podemos encontrar en el libro [3].

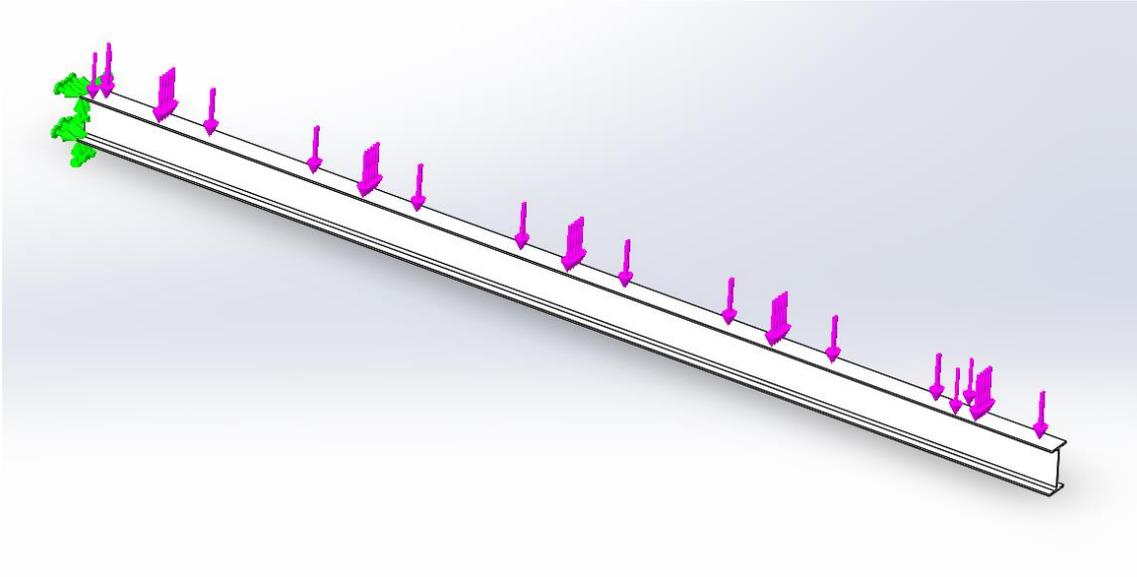


Figura 18: Enunciado del problema en 3D

Se realizará un análisis estático lineal y también el cálculo de los factores de inestabilidad (o pandeo).

Aplicando las ecuaciones de resistencia de materiales, obteniéndose los resultados buscados. Así, por ejemplo, para el problema simple planteado, la figura 16 muestra los esfuerzos, las reacciones y los desplazamientos.

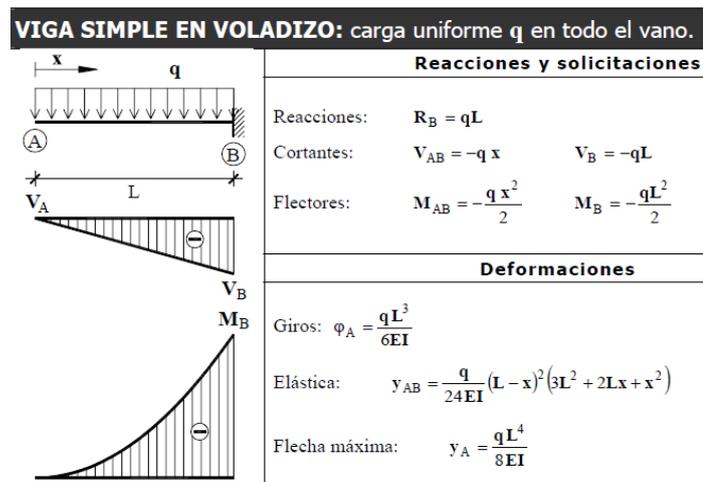
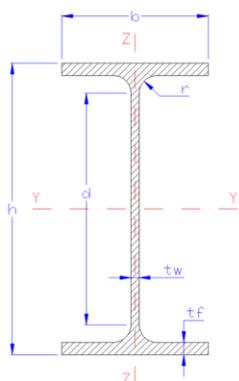


Figura 19: Ecuaciones para resolver el problema

La viga que se va a usar para el ensayo tiene el perfil IPE270 con 6 m de largo y una carga de 100 N a lo largo de toda la viga.



IPE	Dimensiones						Sección A cm <sup>2</sup>	Peso G Kg/m	Propiedades de la Sección					
	h mm	b mm	t <sub>w</sub> mm	t <sub>f</sub> mm	r mm	d mm			Referido al eje y-y			Referido al eje z-z		
									I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm	I <sub>z</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>z</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>z</sub> cm
IPE 80	80	46	3.8	5.2	5	59.6	7.64	6	80.14	20.03	3.24	8.49	3.69	1.05
IPE 100	100	55	4.1	5.7	7	74.6	10.32	8.1	171	34.2	4.07	15.9	5.79	1.24
IPE 120	120	64	4.4	6.3	7	93.4	13.2	10.4	318	53	4.9	27.7	8.65	1.45
IPE 140	140	73	4.7	6.9	7	112.2	16.4	12.9	541	77.3	5.74	44.9	12.3	1.65
IPE 160	160	82	5	7.4	9	127.2	20.1	15.8	869	109	6.58	68.3	16.7	1.84
IPE 180	180	91	5.3	8	9	146	23.9	18.8	1,320	146	7.42	101	22.2	2.05
IPE 200	200	100	5.6	8.5	12	159	28.5	22.4	1,940	194	8.26	142	28.5	2.24
IPE 220	220	110	5.9	9.2	12	177.6	33.4	26.2	2,770	252	9.11	205	37.3	2.48
IPE 240	240	120	6.2	9.8	15	190.4	39.1	30.7	3,890	324	9.97	284	47.3	2.69
IPE 270	270	135	6.6	10.2	15	219.6	45.9	36.1	5,790	429	11.2	420	62.2	3.02

Figura 20: Tabla de datos de las vigas IPE

Datos:

$$qL=100 \text{ N}$$

$$E=2.1 \cdot 10^{11} \text{ Nm}^2$$

$$L=6 \text{ m}$$

$$q=16.66 \text{ N/m}$$

$$I_z=5.79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Se resuelve:

$$M_{\max}=(q \cdot L^2)/2=300 \text{ Nm}$$

$$W_z=2 \cdot (I_z/h)=4.29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Sigma}=M_{\max}/W_z=7 \text{ E5 Pa}$$

$$\text{Delta}=(q \cdot L^4)/(8 \cdot E \cdot I)=2.22 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Una vez obtenidos los resultados. Se modela el problema, con el fin de usar elementos finitos tipo volumétrico (solid) o lámina de pequeño espesor (shell) en SolidWorks. Se resuelve de dos formas: en modelo superficial y en modelo volumétrico.

Para ello se dibuja la viga en el SolidWorks. Primero en modelo superficial o Shell. Lo ideal sería dibujar las superficies medias, pero esto generará problemas y complicaciones a la hora de crear el ensamblaje del chasis. Para tener una uniformidad en todo el trabajo, se analiza la viga de la misma manera que se hará en el ensamblaje posteriormente.

Se dibuja un croquis que defina las caras exteriores de las alas y media del alma. Posteriormente, cuando se introduce el espesor de las caras, se puede definir la dirección de este. De esta manera la viga estará bien definida y facilitará el montaje del ensamblaje.

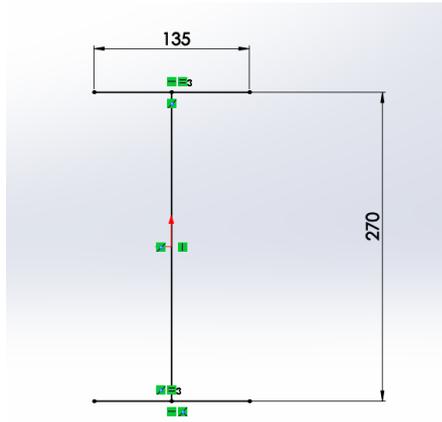


Figura 21: Croquis de la IPE en modelo superficial

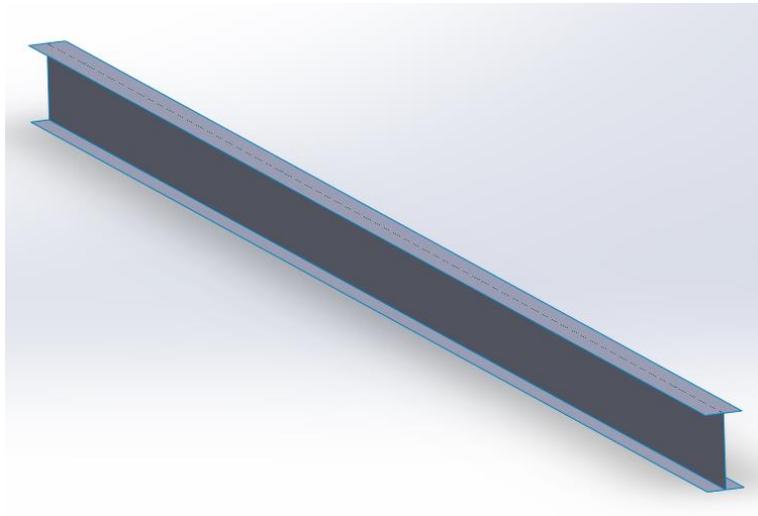


Figura 22: Extrusión de la viga en modelo superficial

También se dibuja la viga en modelo volumétrico. Para este caso, se definirá lo más exactamente posible.

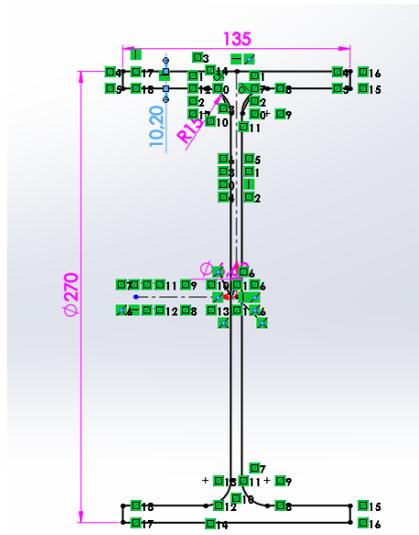


Figura 23: Croquis de la IPE en modelo volumétrico

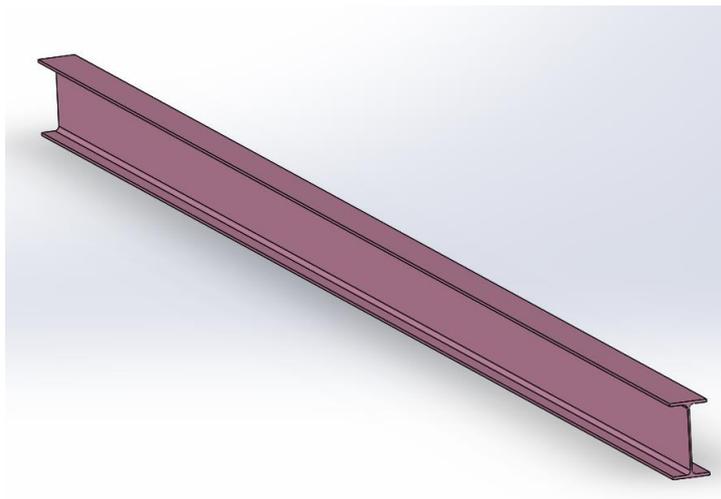


Figura 24: Extrusión de la viga en modelo volumétrico

Una vez se obtiene la pieza dibujada, se va al módulo de Simulation para resolver el problema.

Se comienza por el más sencillo, la pieza dibujada en volumen. Primero nos pedirá el material de la pieza.

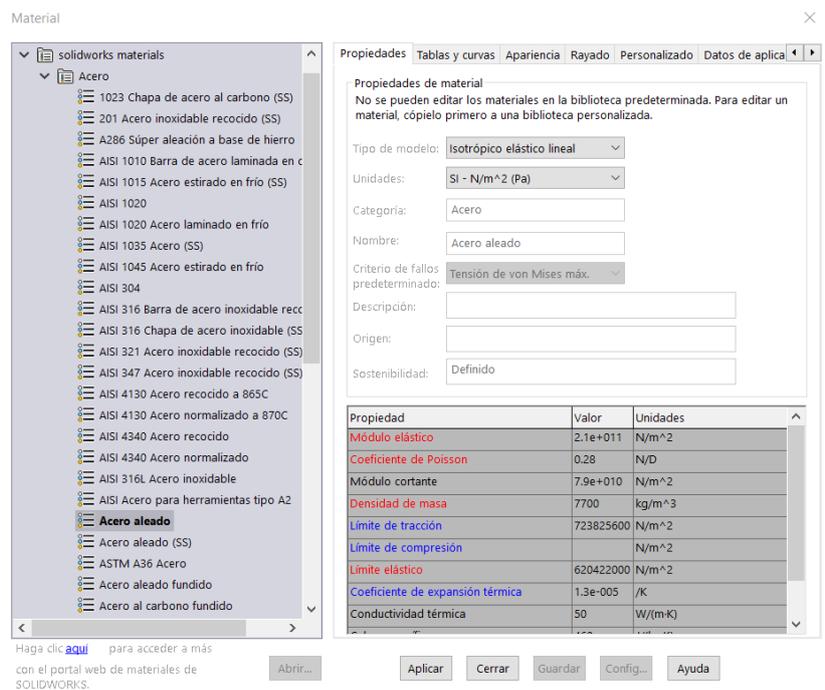


Figura 25: Elección del material de la viga en el modelo volumétrico

Después se introduce el apoyo. Se selecciona la “geometría fija” y luego la cara que estaría empotrada.

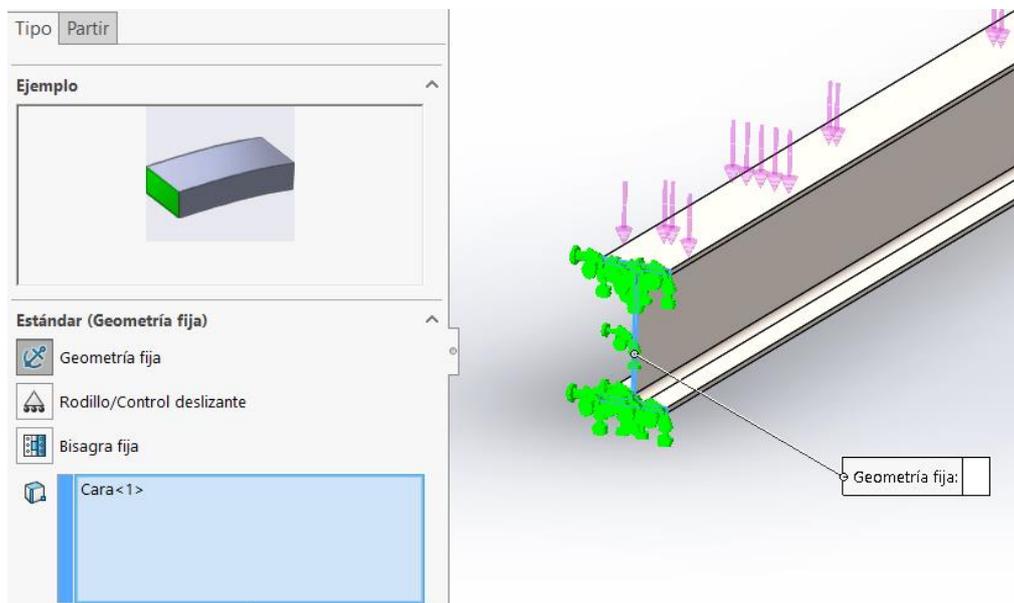


Figura 26: Detalle del apoyo de la viga en el modelo volumétrico

Se aplica la carga en una cara. La carga tendrá dirección negativa en el eje Y.

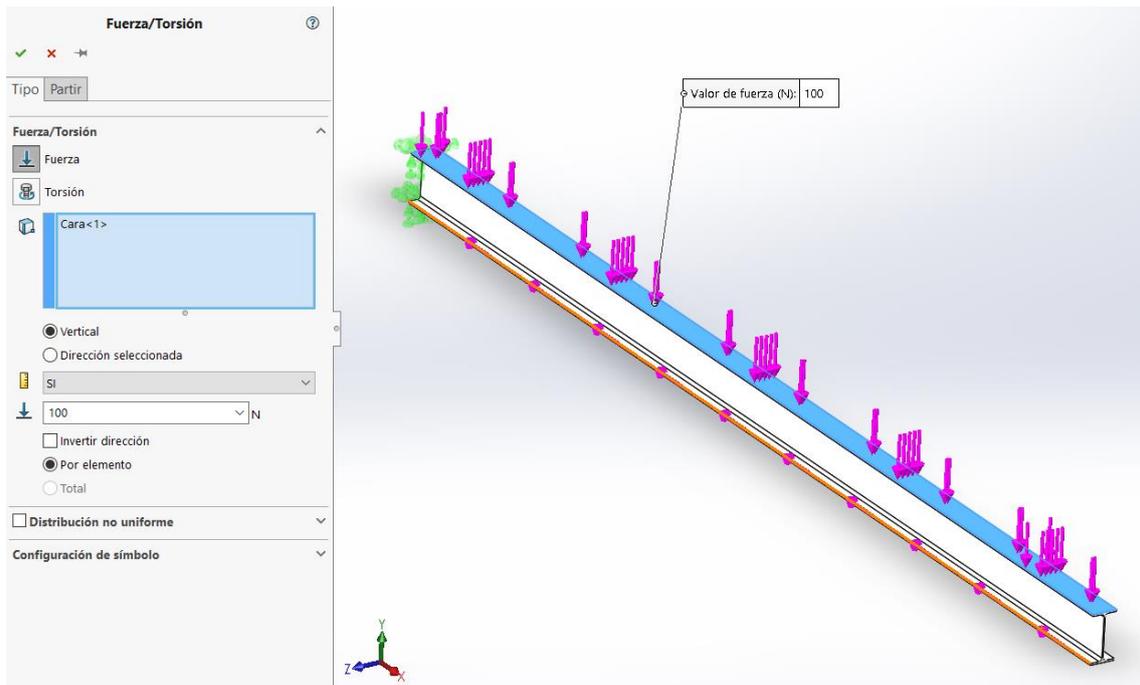


Figura 27: Detalle de la carga en modelo volumétrico

Una vez aplicadas las condiciones de contorno, se pasa a resolver. Primero se genera la malla. Para los diseños en modelos volumétricos, es recomendable seleccionar el mallado en curvatura. Da menos fallos y se aproxima más a la realidad.

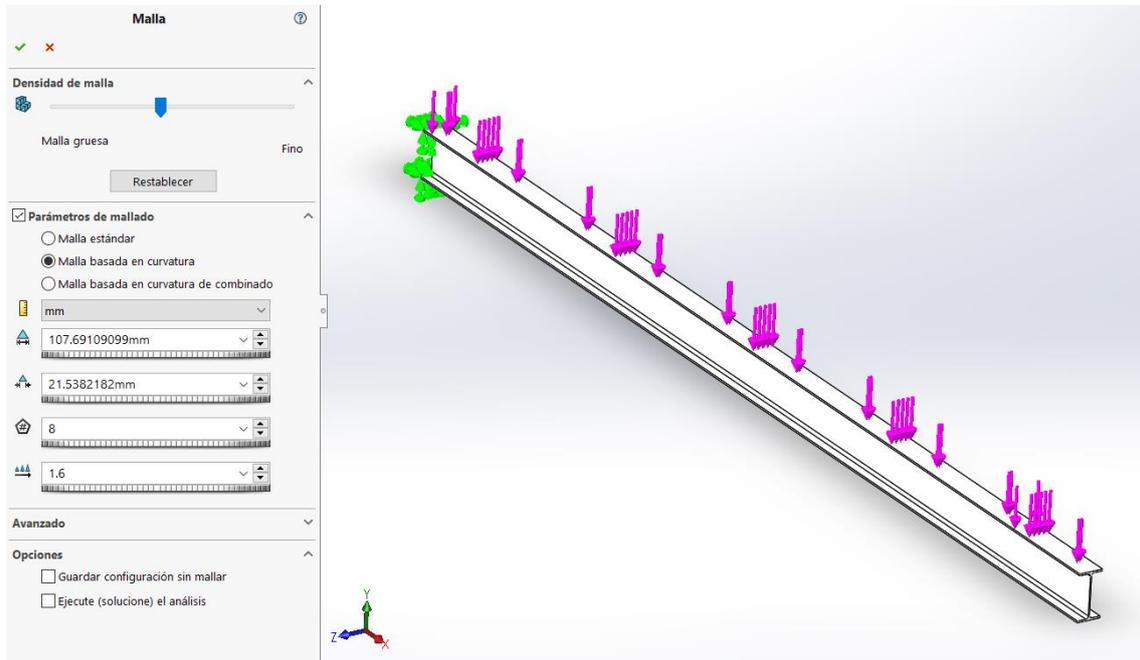


Figura 28: Detalle de la malla en el modelo volumétrico

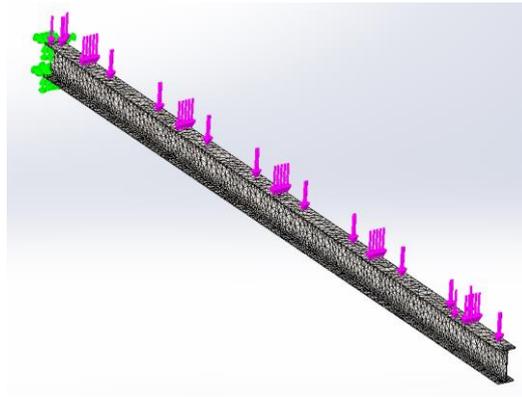


Figura 29: Malla finalizada en el modelo volumétrico

El software nos genera un informe con datos sobre la malla.

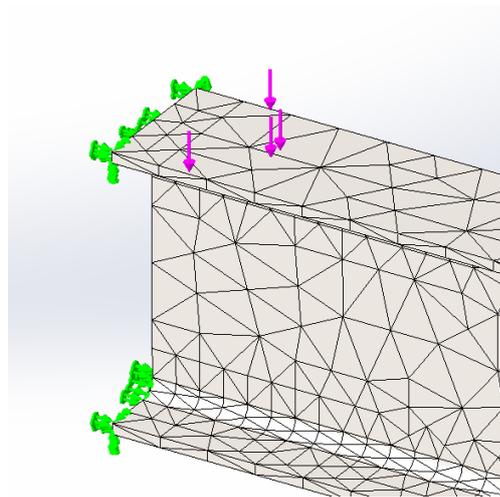


Figura 30: Detalle de malla

## Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	107.691 mm
Tamaño mínimo del elemento	21.5382 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

## Información de malla - Detalles

Número total de nodos	47124
Número total de elementos	23252
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04

Y, por último, se obtienen los resultados.

En la Figura 31 se ve el reparto de cargas. El punto de mayor tensión, será lógicamente, la cara empotrada, como se puede ver en el gráfico. La tensión en ese punto es de  $7,54 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ .

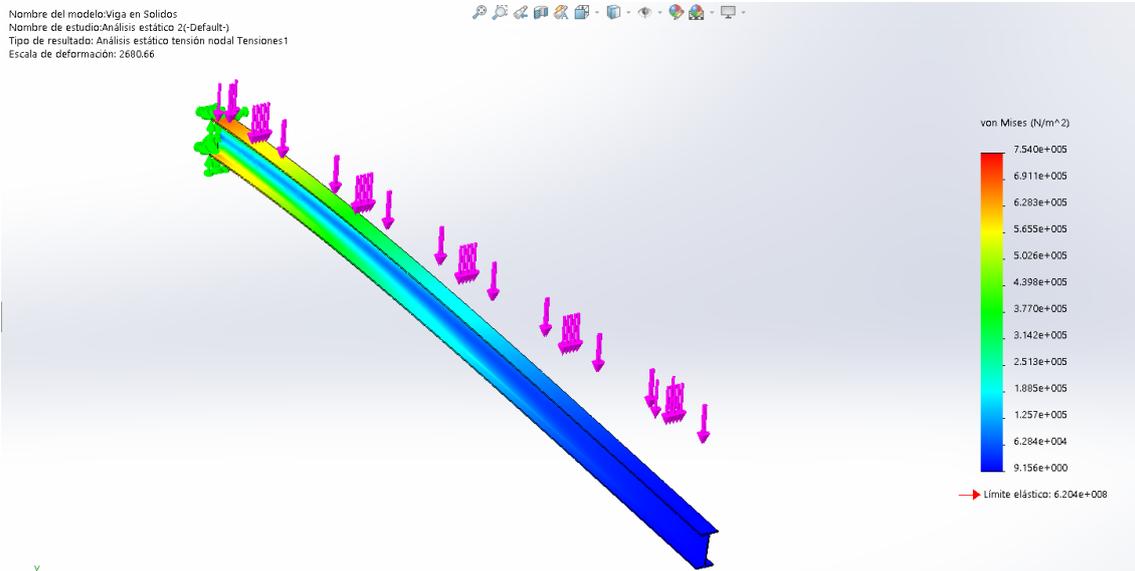


Figura 31: Resultados de reparto de cargas de la viga en el modelo volumétrico

En la Figura 32 se ven los desplazamientos de la viga. Siendo la cara opuesta a la empotrada la que más se va a desplazar. Esa cara tendrá un desplazamiento de 0.2239 mm.

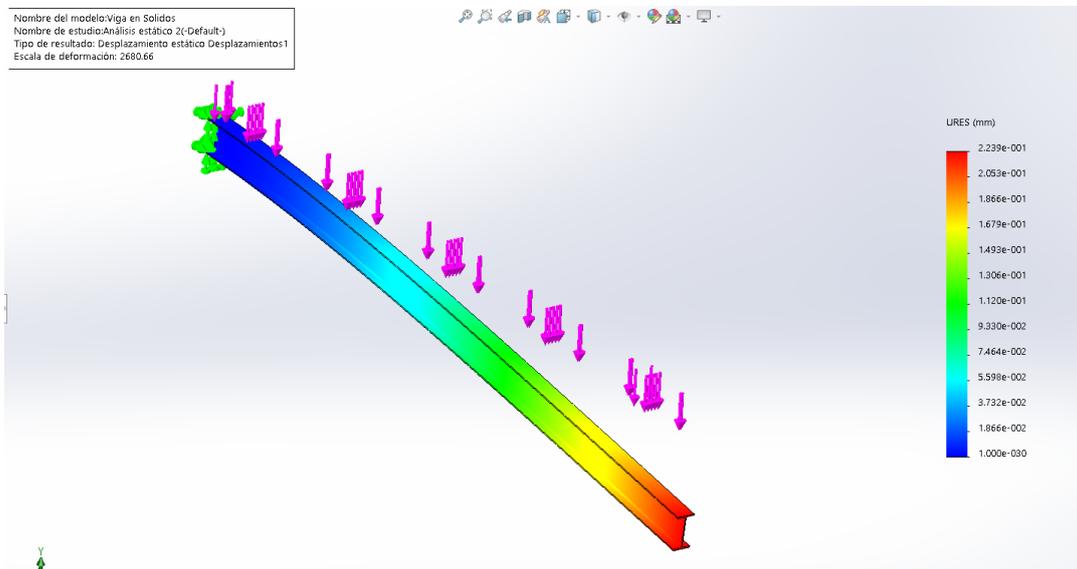


Figura 32: Resultado de los desplazamientos de la viga en el modelo volumétrico

También, se puede realizar el análisis de pandeo. Para ello se introducen las mismas condiciones de contorno y se ejecuta el estudio. Nótese que este análisis devuelve el número por el que hay que multiplicar el estado de cargas para que se produzcan fenómenos inesperados según la resistencia de materiales. Por tanto, si esos factores son mayores que 1, para las cargas actuantes no aparecerán. El factor de pandeo para este caso es de 470 para lo que habría que multiplicar la carga por este valor para que volcara.

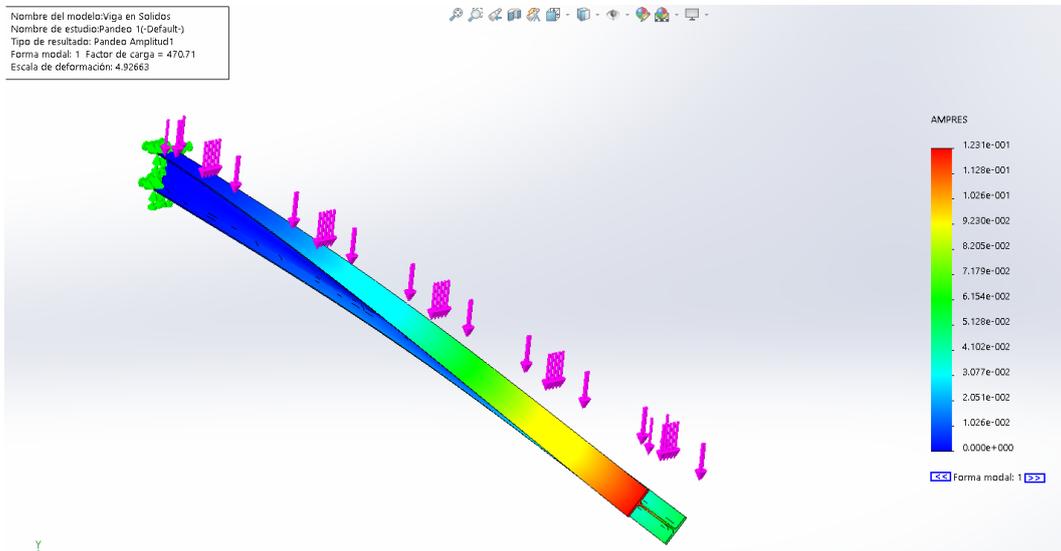


Figura 33: Primer resultado de pandeo de la viga en el modelo volumétrico

El pandeo que se observa en la figura 33 es conocido como vuelco lateral en el que el valor más crítico es el menor número positivo de la escala.

Para realizar un estudio de pandeo más completo. Se analizarán distintas formas de pandeo. Para ello se tienen que cambiar una opción en propiedades del ensayo.

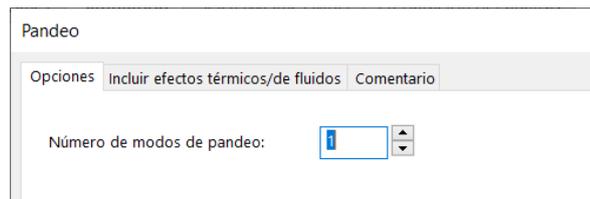


Figura 34: Cambio del número de formas de pandeo de la viga en el modelo volumétrico

De esta manera se pueden ver distintas formas de pandeo para el ensayo.

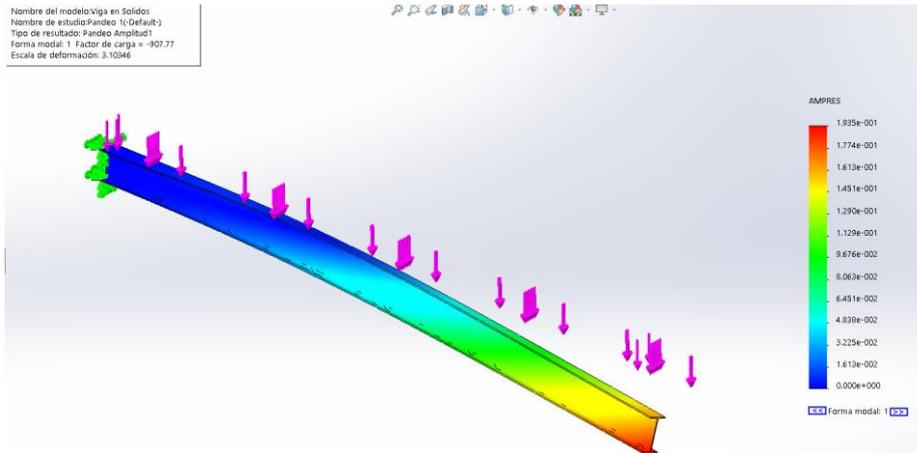


Figura 35: Forma modal 1 de la viga en el modelo volumétrico

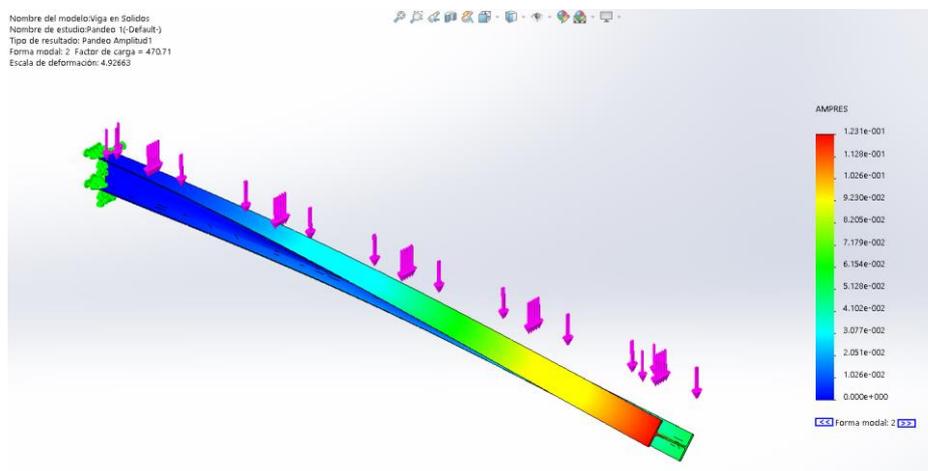


Figura 36: Forma modal 2 de la viga en el modelo volumétrico

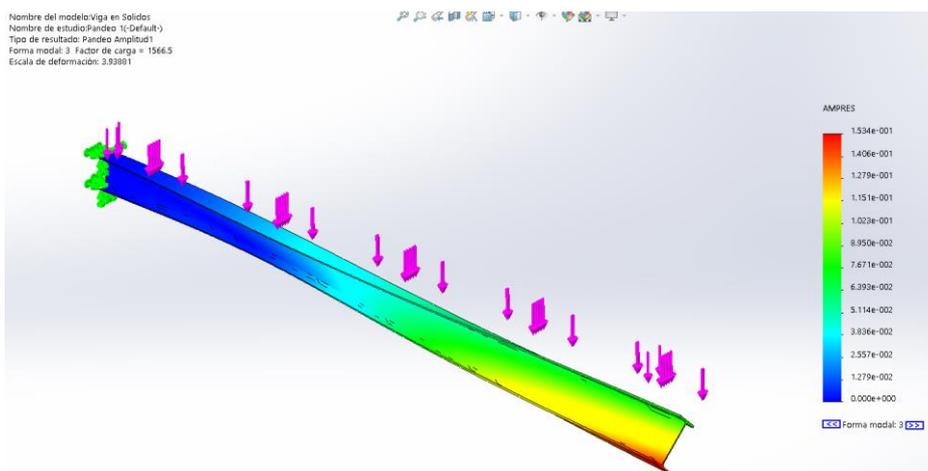


Figura 37: Forma modal 3 de la viga en el modelo volumétrico

Ahora, se vuelve a resolver el problema. Esta vez será con la pieza en modelo superficial. Se abre el módulo Simulation del Solid. Y se aplica el material, esta vez nos discriminará las caras.



Figura 38: Material y espesor de las superficies de la viga en modelo superficial

También se dará un espesor a las superficies. Por la forma que se ha dibujado el perfil, se tendrán que dar el espesor en una dirección u otra o equidistantemente. De tal forma que el espesor tendría la dirección que se ve en las figuras 39 y 40:

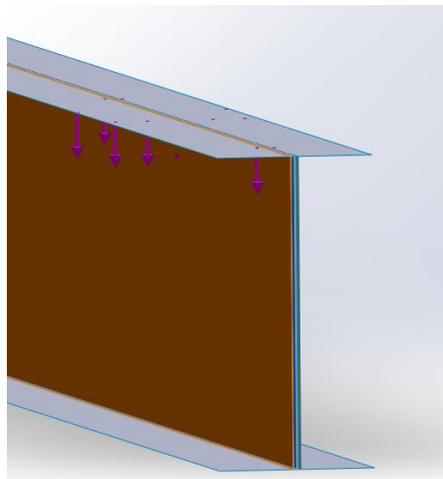


Figura 39: Detalle del espesor del alma de la viga en modelo superficial

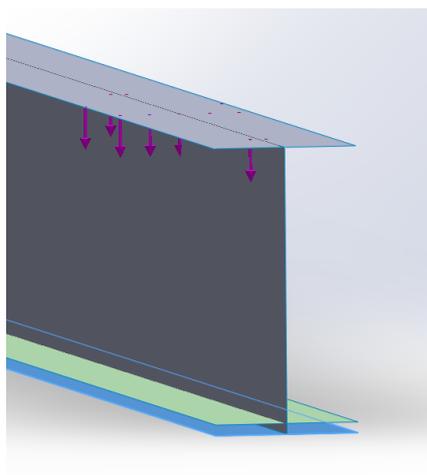


Figura 40: Detalle del espesor del ala de la viga en modelo superficial

En modelo superficial, el programa interpreta que cada superficie es una pieza independiente. Se deberá definir la unión entre superficies. Es importante definir la unión entre las superficies ya que esto puede condicionar todo el ensayo.



Figura 41: Definición de la unión entre superficies de la viga

Los siguientes pasos son similares a la pieza en el modelo volumétrico. Se define el apoyo. Esta vez se selecciona las aristas que estarán empotradas en vez de la cara como se hizo en el ensayo en modelos volumétricos.

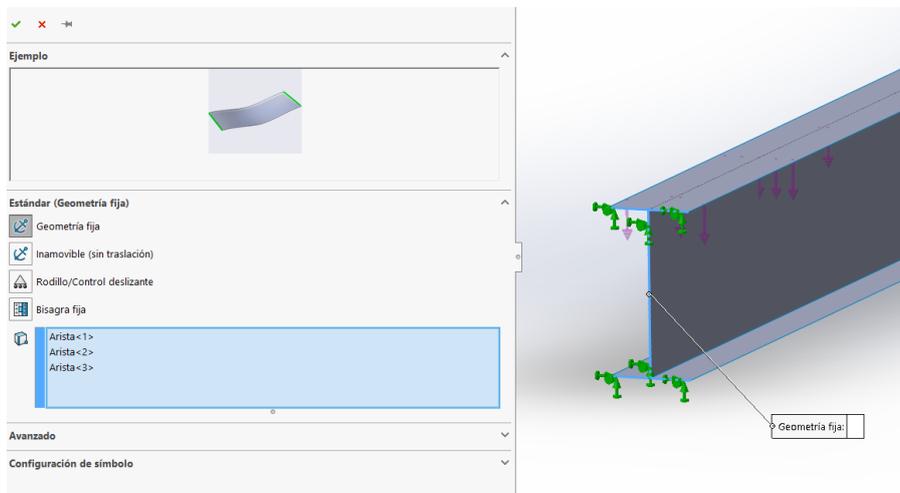


Figura 42: Definición del empotramiento de la viga en modelo superficial

Se aplica la carga en una de las superficies.

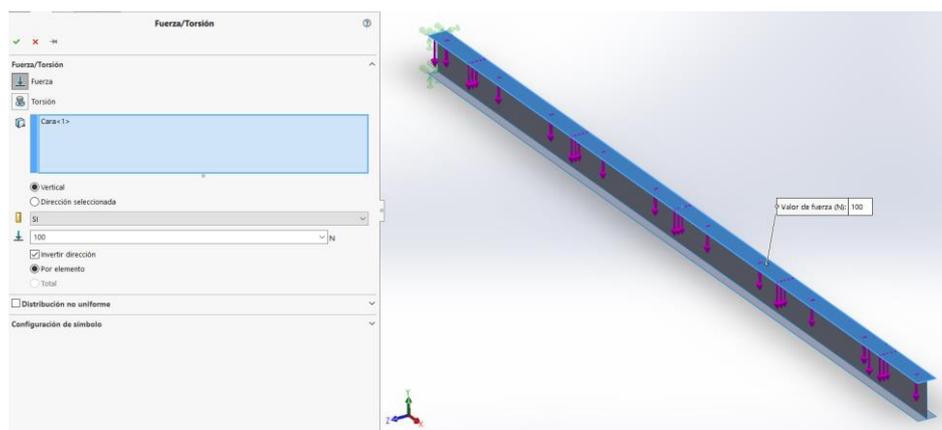


Figura 43: Definición de la carga de la viga en modelo superficial

Se genera la malla. Cuando se crea una malla con modelo superficial, mayoritariamente planas, es recomendable usar un mallado estándar. Este mallado se compila rápido y no difiere mucho del resultado correcto.

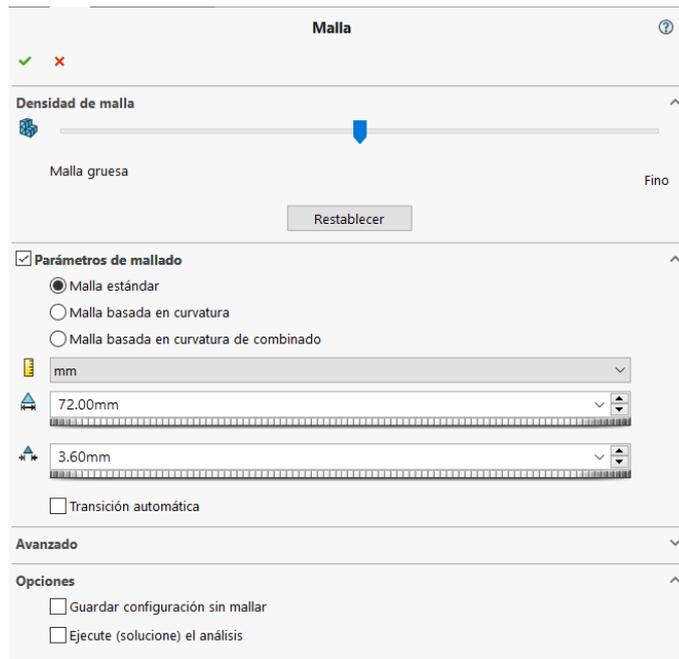


Figura 44: Definición de la malla de la viga en modelo superficial

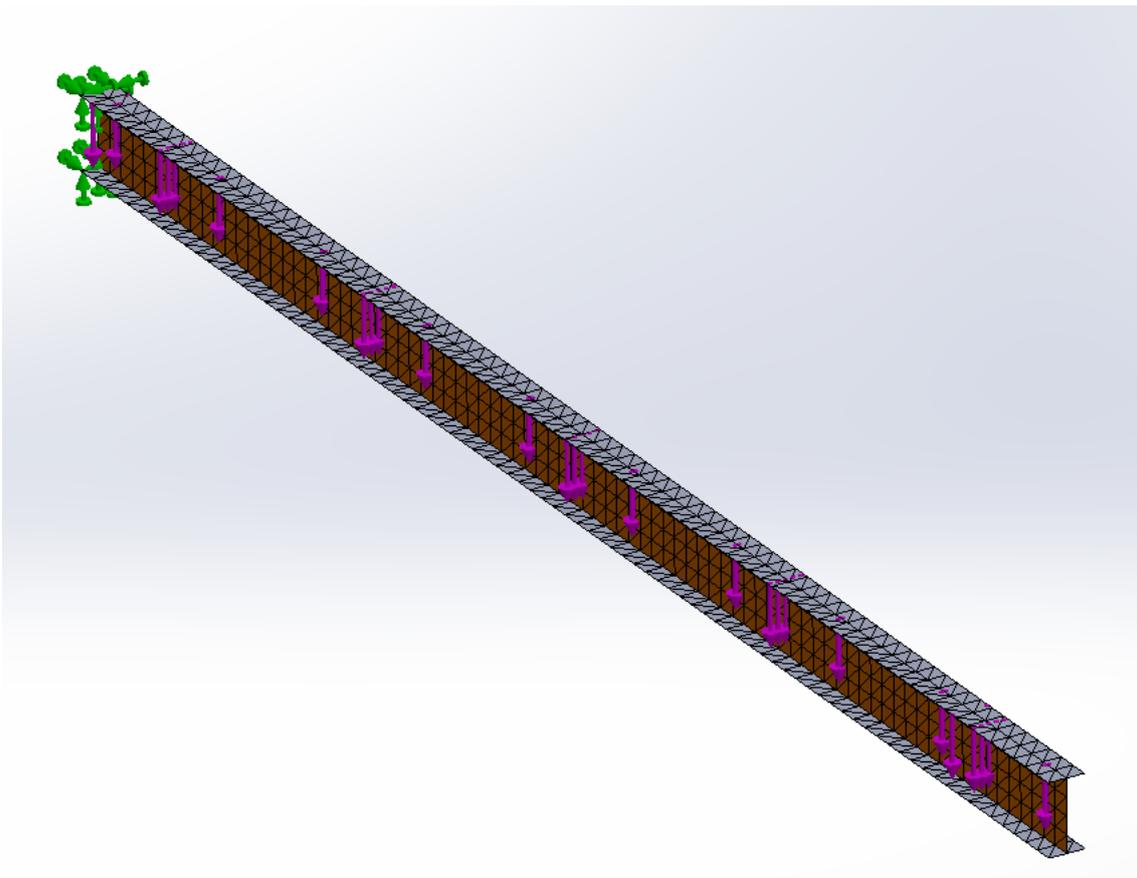


Figura 45: Malla de la viga en modelo superficial

El software genera un informe sobre la malla:

## Información de malla

Tipo de malla	Malla con elementos SHELL de superficies
Mallador utilizado:	Malla estándar

## Información de malla - Detalles

Número total de nodos	3207
Número total de elementos	1344
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:01

Y se obtienen los resultados. De forma análoga al ensayo en modelos volumétricos, el software genera el resultado de reparto de cargas (Figura 46) y los desplazamientos (Figura 47).

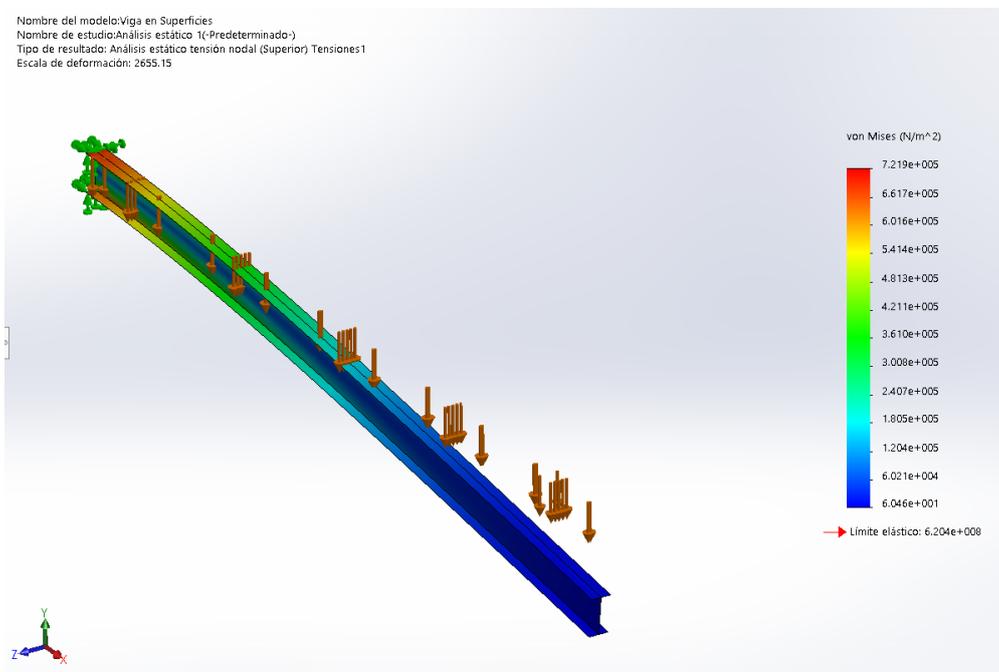


Figura 46: Reparto de caras de la viga en modelo superficial

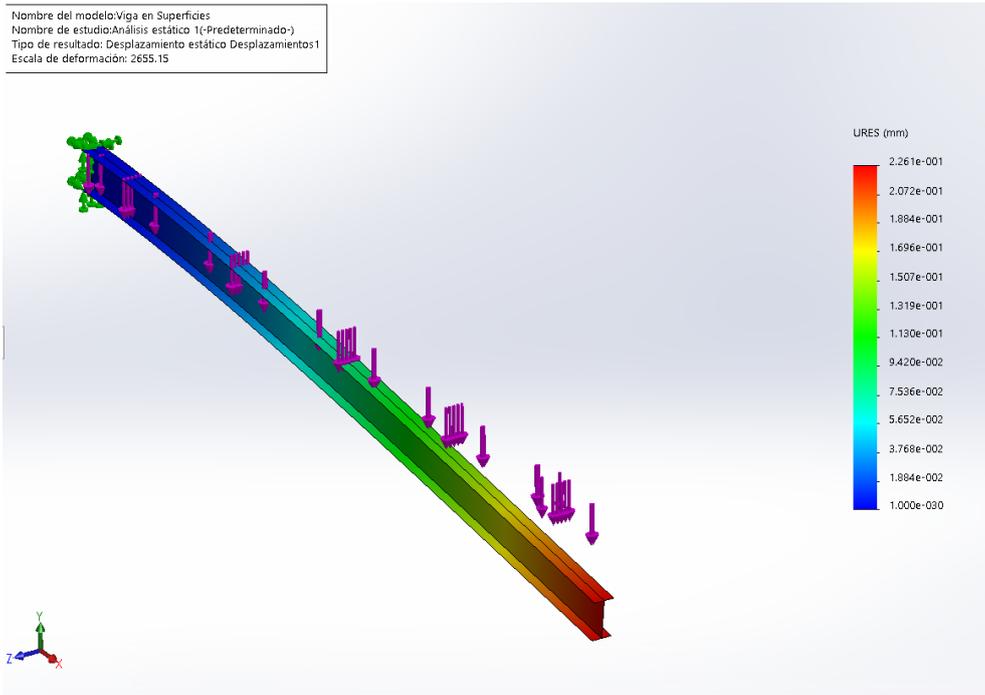


Figura 47: Desplazamientos de la viga en modelo superficial

De forma análoga al problema de la viga en sólidos, se puede realizar el ensayo de pandeo sobre la viga en modelo superficial. Se comprueba que el factor de carga o pandeo sea mayor que 1.

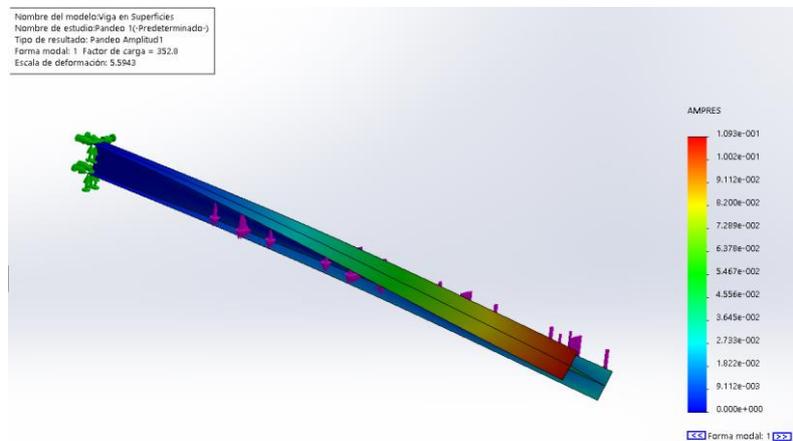


Figura 48: Primer resultado de pandeo de la viga en modelo superficial

Y de la misma manera, se cambia el número de formas de pandeo que se quiere analizar.

## Pandeo

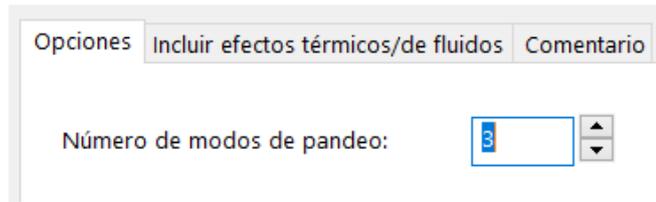


Figura 49: Cambio a 3 formas de pandeo de la viga en modelo superficial

Obteniendo estos resultados:

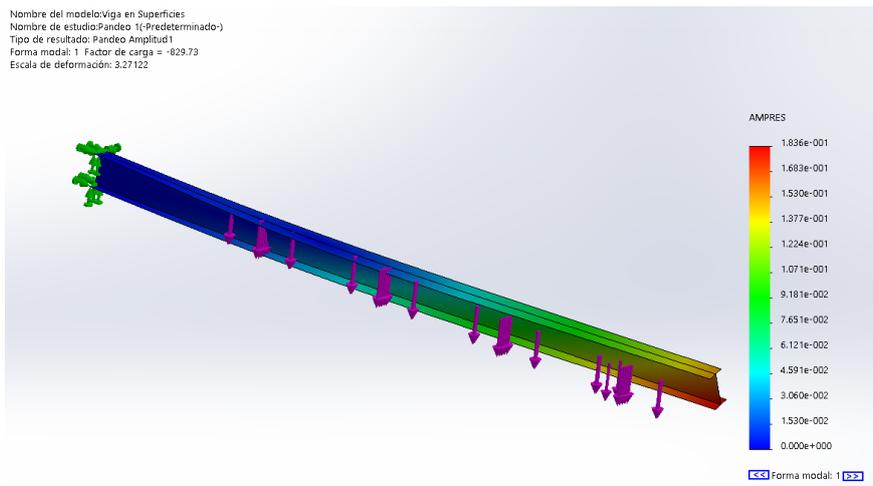


Figura 50: Forma modal 1 de la viga en modelo superficial

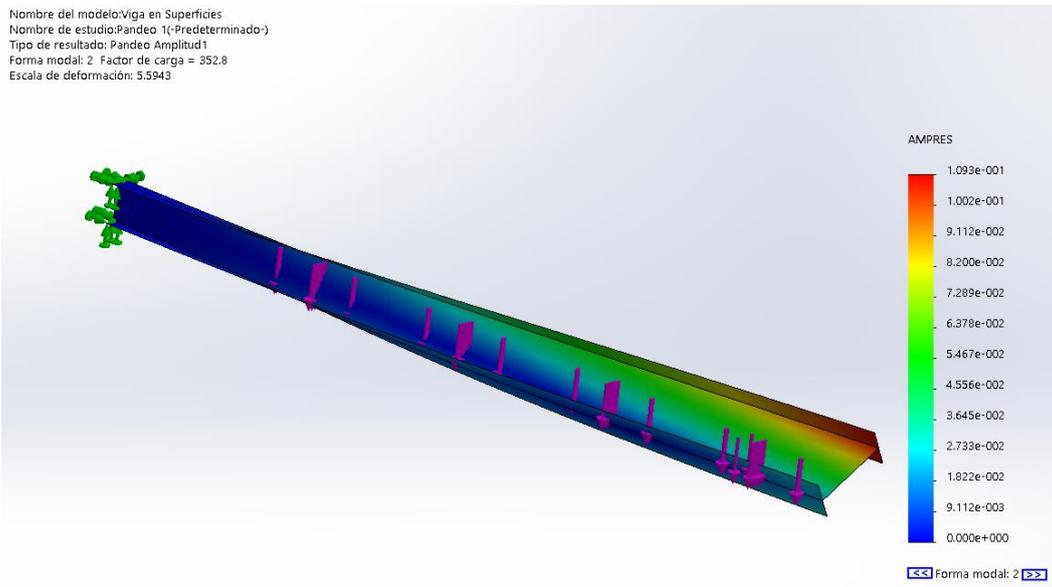


Figura 51: Forma modal 2 de la viga en modelo superficial

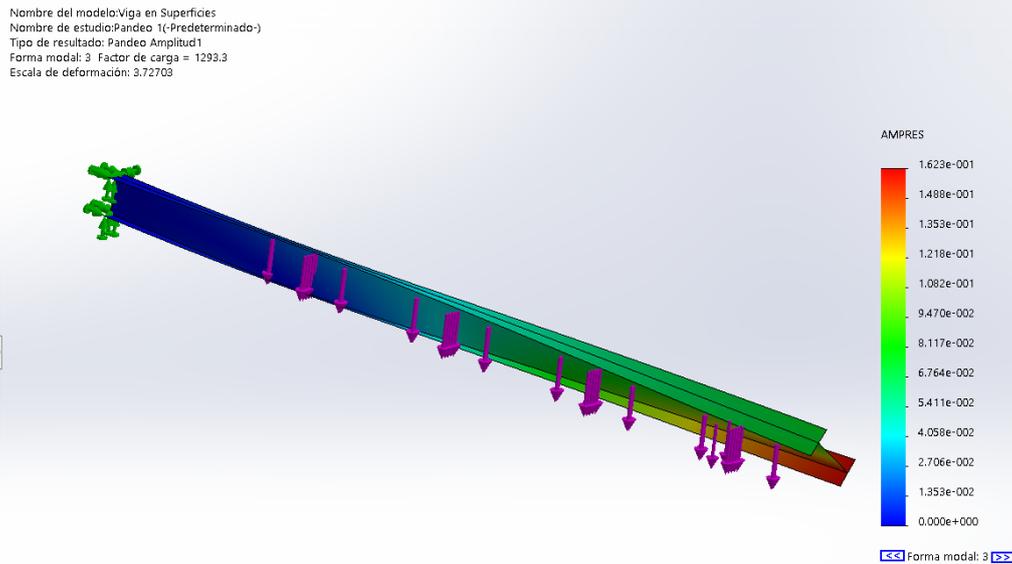


Figura 52 :Forma modal 3 de la viga en modelo superficial

Como se puede observar, de ambos modos se tienen resultados muy similares a los obtenidos matemáticamente. Por lo que se puede asumir que el software resuelve el problema satisfactoriamente.

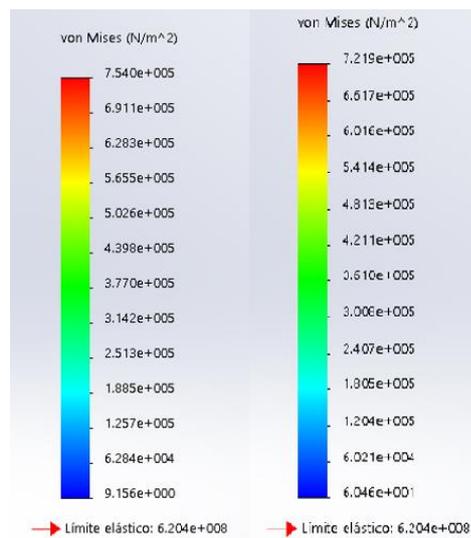


Figura 53: Comparativa del reparto de cargas de las vigas

En esta imagen se ve la escala de los esfuerzos que sufre la viga y se puede ver que son similares. A la izquierda se ve el de la viga en modelo volumétrico y a la derecha superficial.

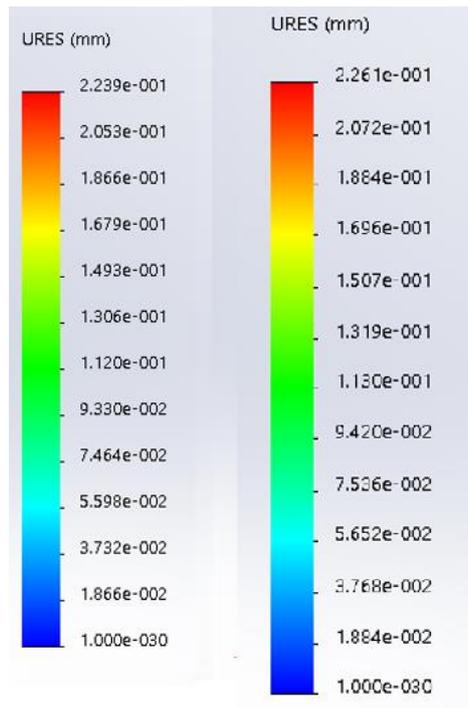


Figura 54: Comparativa de los desplazamientos de las vigas

En esta imagen se ve la escala de los desplazamientos que sufre la viga y se puede ver que son similares. A la izquierda se ve el de la viga en modelo volumétrico y a la derecha superficial.

Si comparamos los resultados obtenidos con el software con los resueltos de la figura 19 vemos una gran similitud. La tensión máxima y desplazamientos obtenidos teóricamente era de  $710^5$  Pa y  $2.22 \cdot 10^{-4}$  m mientras que en el módulo volumétrico son  $7.54 \cdot 10^5$  Pa y  $2.239 \cdot 10^{-4}$  m y en el módulo superficial de  $7.219 \cdot 10^5$  Pa y  $2.261 \cdot 10^{-4}$  m. Los datos son tan próximos como para confirmar que el software ha resuelto el ejercicio de una forma correcta. Se pueden hacer otro tipo de validaciones siguiendo apuntes [4]

También se puede saber que el problema resuelto con modelo superficial demanda menos capacidad de procesamiento por parte del PC. Aunque no sea cien por cien exacto, el error es tan mínimo que merece la pena realizar cálculos en modelo superficial. Ya que se hacen de manera más ágil y rápida.

# Modelado del empuje

La estructura está formada por perfiles comerciales y piezas plegadas de chapa que se fabrican dentro del taller.

Los perfiles comerciales se dibujan aplicando una extrusión a un croquis, de la misma forma que se ha mostrado en la verificación anterior.

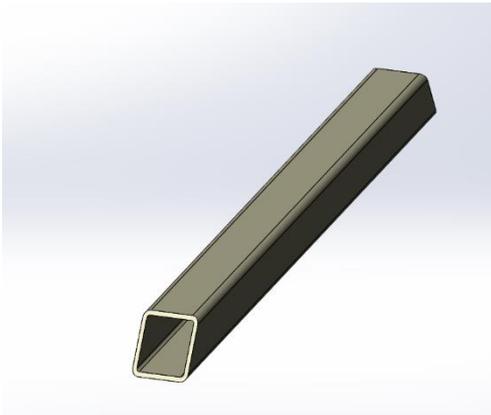


Figura 55: Imagen de un tubo en modelo volumétrico

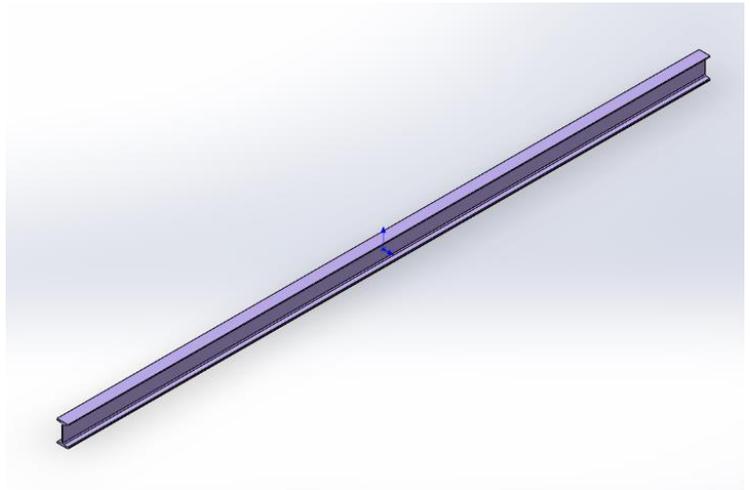


Figura 56: Imagen de una viga en modelo volumétrico

Las piezas plegadas se pueden dibujar de muchas formas, la más común es dibujar un croquis del perfil y aplicar extrusión de chapa plegada.

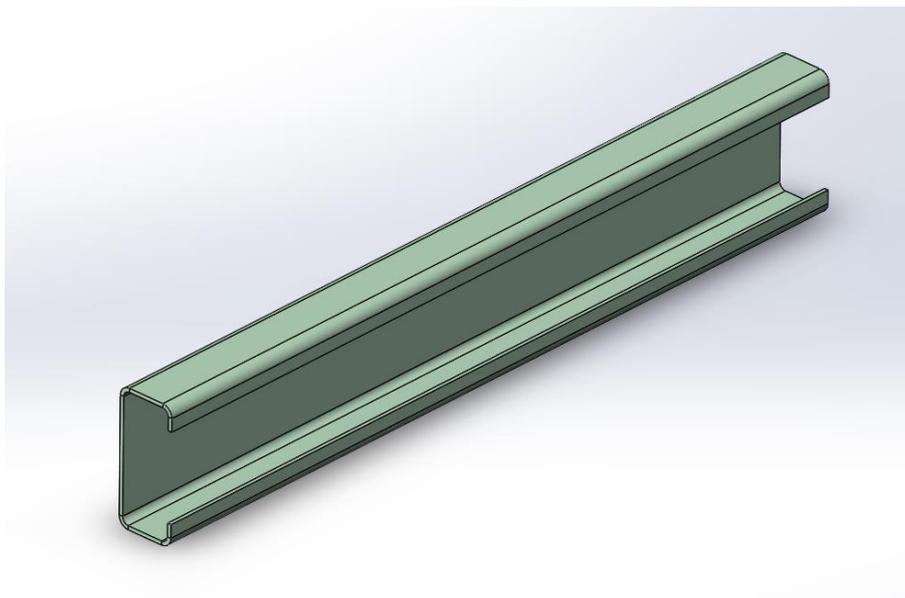


Figura 57: Imagen de una pieza plegada en modelo volumétrico en 3D

Una vez dibujadas las piezas, se agregan a un ensamblaje. Este será el chasis del vehículo.

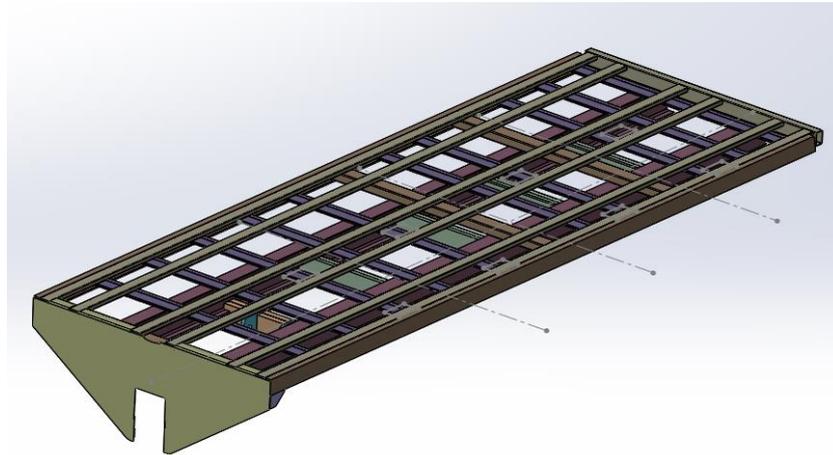


Figura 58: Imagen del montaje del chasis en modelo volumétrico

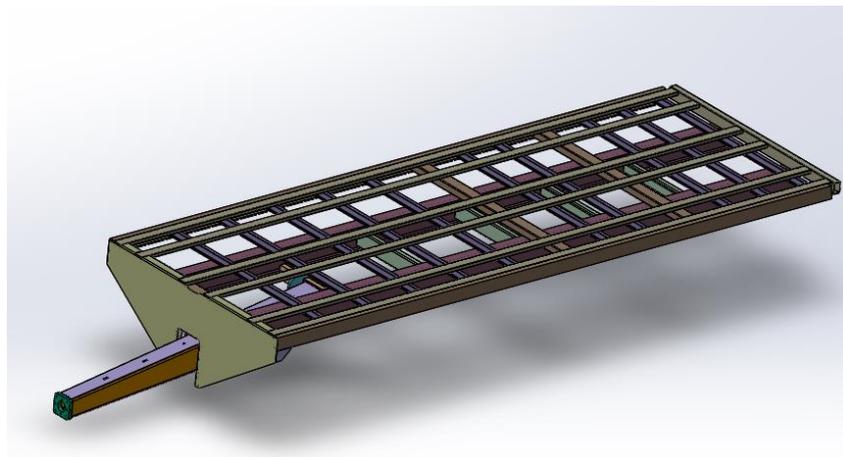


Figura 59: Imagen del chasis con las lanza en modelo volumétrico

Para el diseño siempre se trabaja con las piezas en modelos volumétricos. Como se va a calcular la estructura en modelo superficial. Se vuelve a dibujar todas las piezas en superficies.

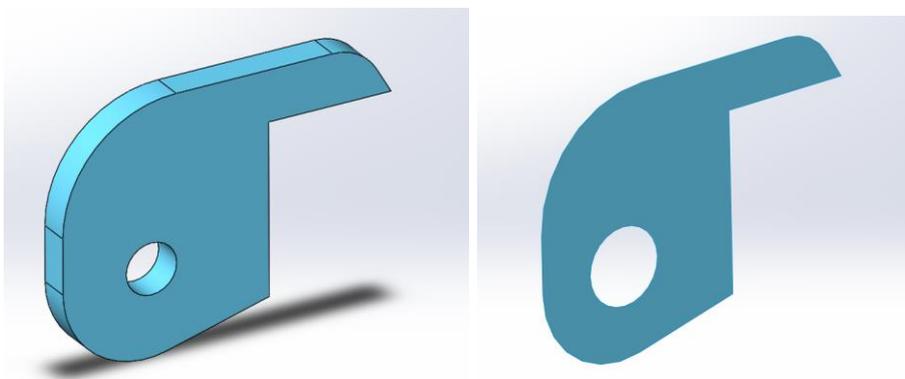


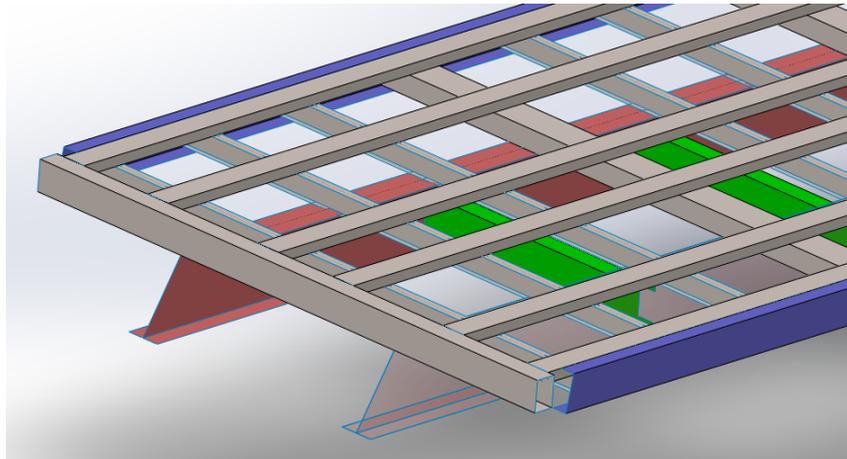
Figura 60: Imagen de la misma pieza en modelo volumétrico y superficial

Se genera otro ensamblaje con las piezas en modelo superficial.



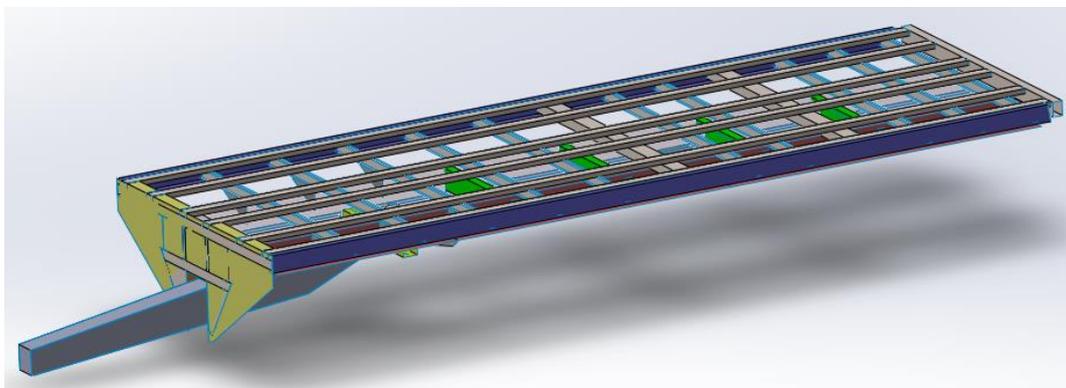
*Figura 61: Vista lateral del chasis en modelo volumétrico*

Las principales diferencias a la hora de diseñar un ensamblaje en modelo volumétrico y en superficial es que hay que tener en cuenta que cuando se va a analizar la estructura, hay que darle espesores a las caras. Por ello se puede optar por la opción de dibujar los contornos exteriores. De esta forma el programa detecta más fácilmente que dos superficies de dos piezas, si se entrecruzan, es que están en contacto.



*Figura 62: Vista de un detalle del chasis en modelo superficial*

Ya se tienen los dos chasis dibujados en modelo volumétrico y superficial.



*Figura 63: Vista general del chasis en modelo superficial*

# Ensayos sobre la estructura

De forma análoga a lo realizado anteriormente en el ensayo de verificación, se va a analizar las estructuras dibujadas.

Con el fin de realizar un ejercicio más real. Se introduce una lanza al ensamblaje. La lanza está unida por dos rótulas al remolque y una al tractor. Si se analizan el chasis sin lanza los resultados son distintos y pueden llevar a equívocos a la hora de diseñar un mejor vehículo.

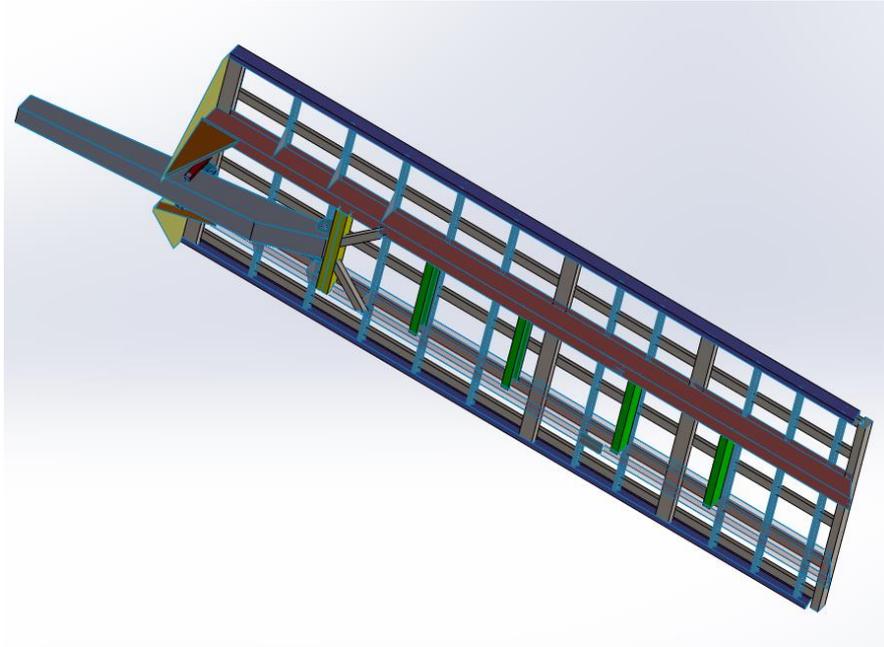


Figura 64: Chasis en modelo superficial

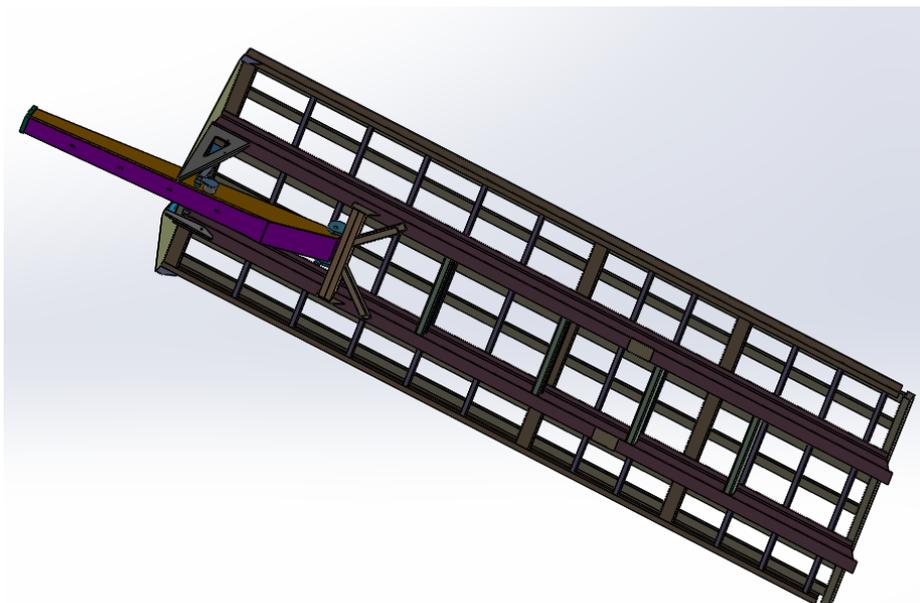


Figura 65: Chasis en modelo volumétrico

Primero se analiza la estructura en modelo volumétrico. Se abre el ensamblaje con el módulo de Simulation de SolidWorks.

Se introducen los materiales de todas las piezas.

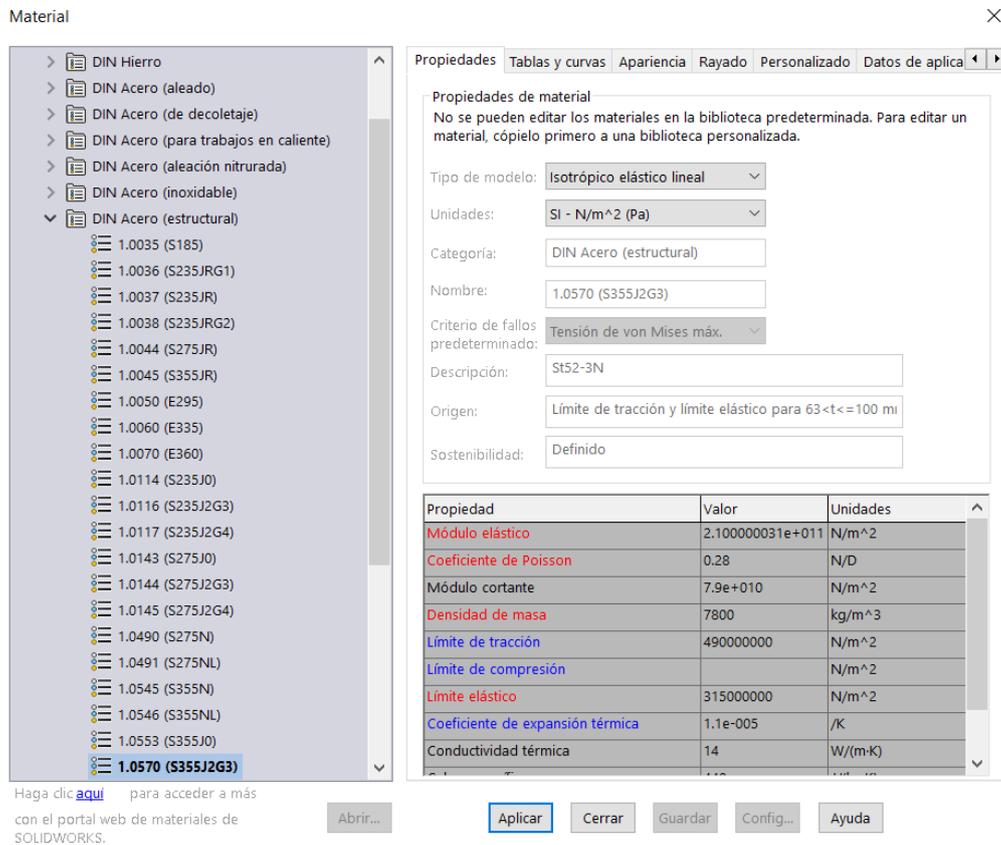


Figura 66: Selección del material de las piezas en modelo volumétrico

Se definen las uniones entre piezas. El chasis tendrá todas sus piezas unidas de manera rígida, ya que todas esas piezas están soldadas.

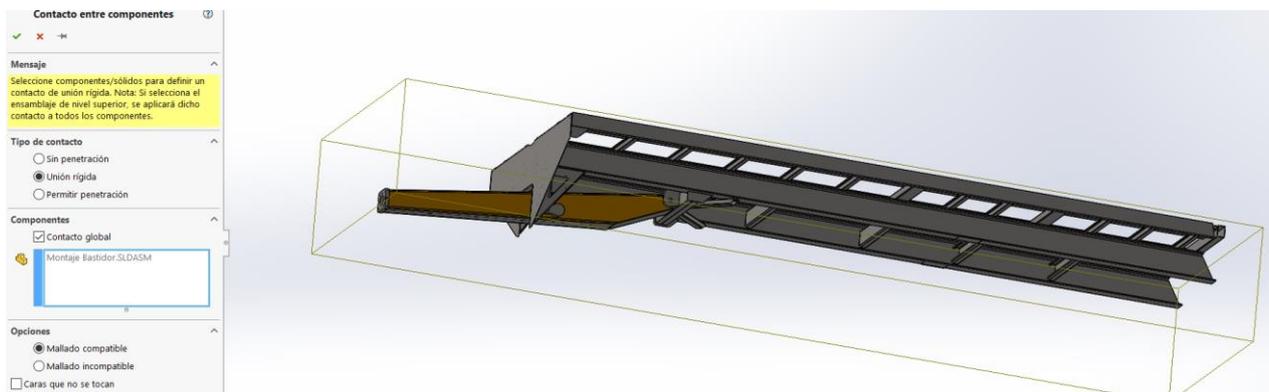


Figura 67: Definición de la unión entre piezas

La lanza irá condicionada al chasis por dos bulones. Uno directo al chasis, en el giro que tiene la lanza. Y el otro, por medio de los cilindros que mueven la lanza. Estos cilindros los meto como si fueran una pieza rígida.

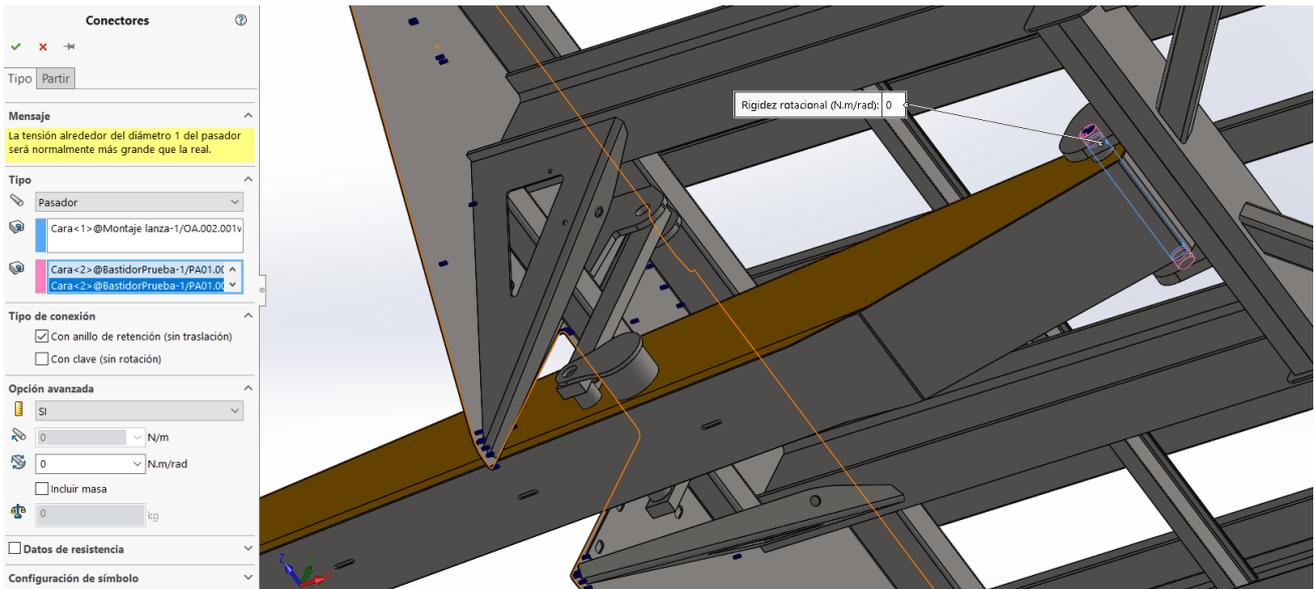


Figura 68: Detalle de unión tipo bulón entre piezas

Después se aplican los apoyos que posee el vehículo. Se define el apoyo de la punta de la lanza, como si estuviera enganchado a un tractor.

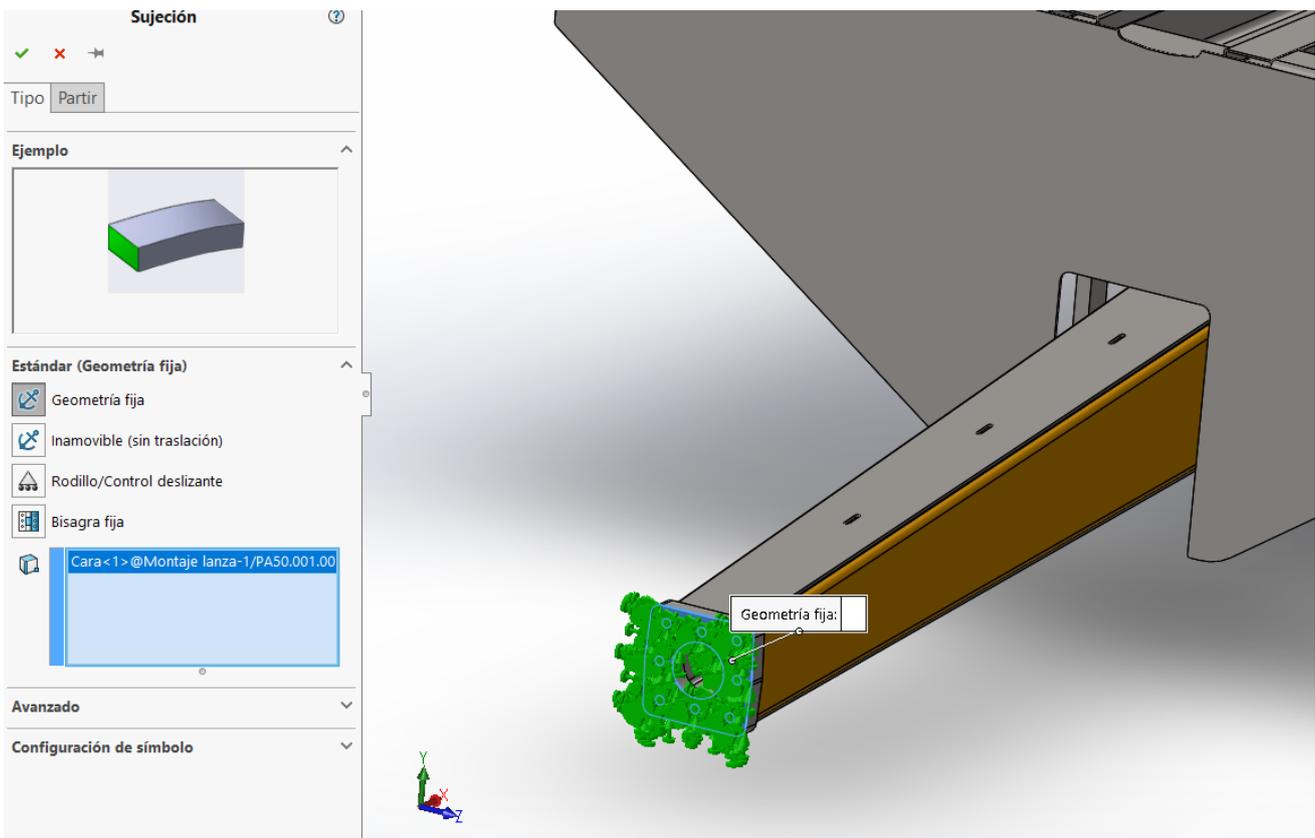


Figura 69: Definición del apoyo de la lanza

Y el apoyo que simula la suspensión, este será un apoyo móvil ya que el remoque va apoyado en ruedas.

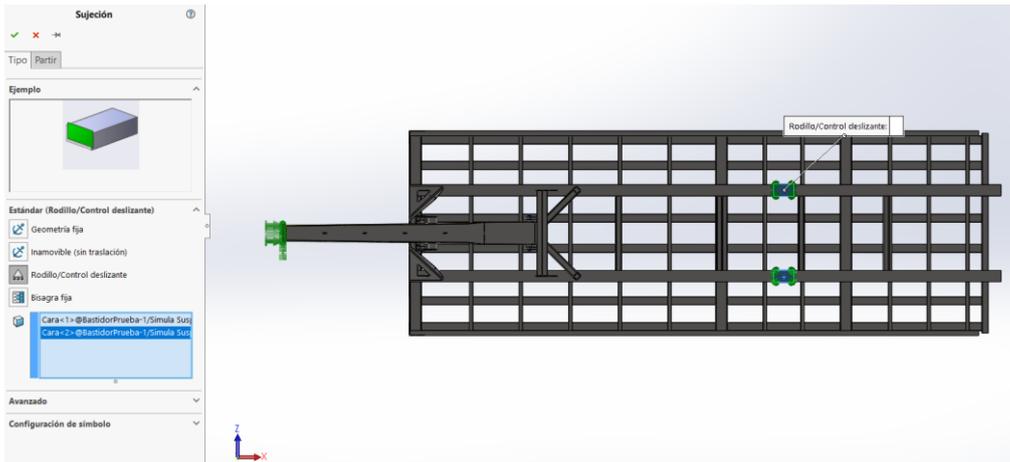


Figura 70: Definición del apoyo de la suspensión

Una vez aplicados los apoyos. Se aplican las cargas, estas serán iguales y repartidas en los tubos superiores de la estructura.

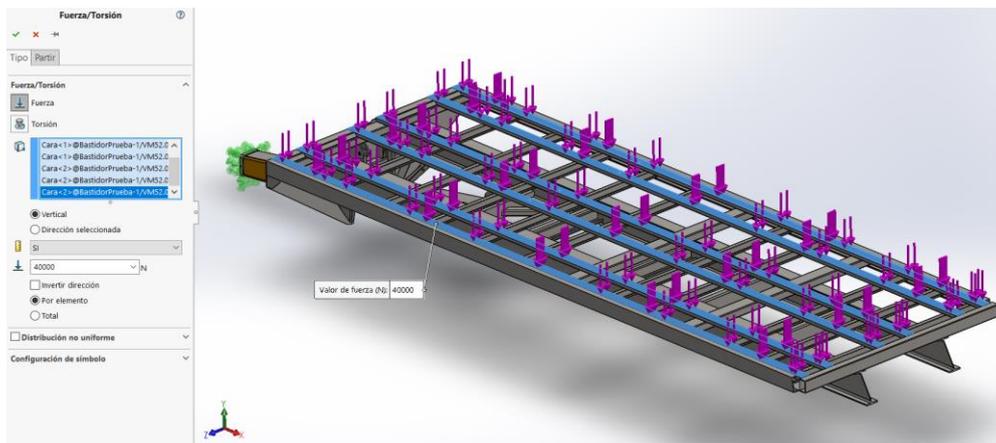


Figura 71: Definición de la carga

Se realiza la malla del chasis.

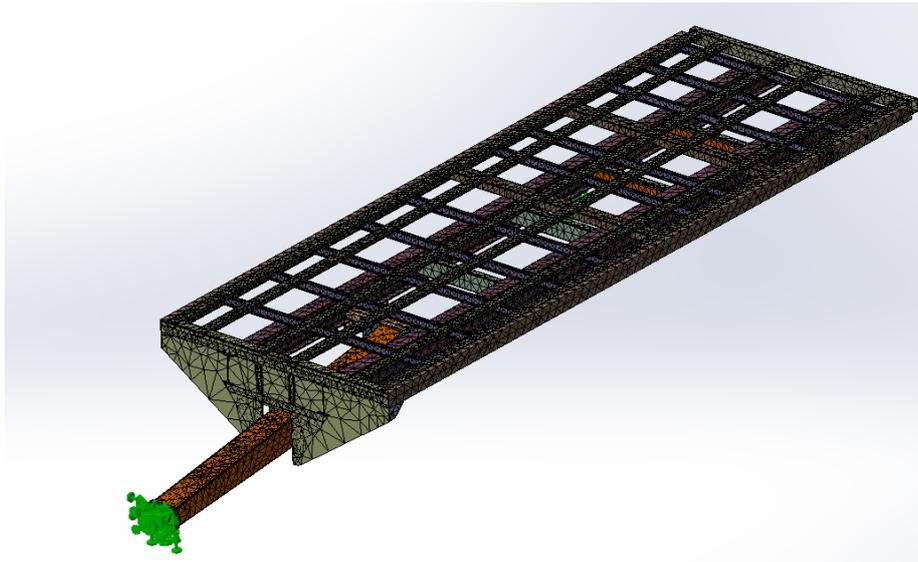


Figura 72: Malla del chasis en modelo volumétrico

Para evitar fallos en el mallado. Se selecciona la opción “mallado en curvatura”, este mallado es el idóneo para este tipo de estructuras.

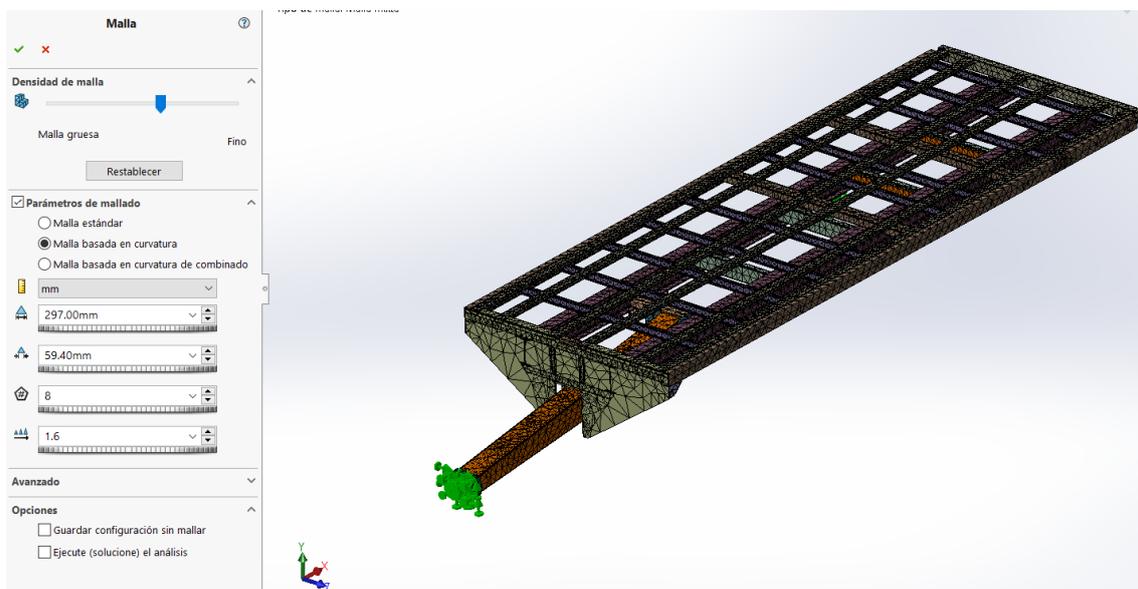


Figura 73: Definición de la malla

Para saber si se tiene alguna pieza con libertades de pueden aplicar un análisis. De esta forma se evita un posible fallo común a la hora de procesar la estructura.

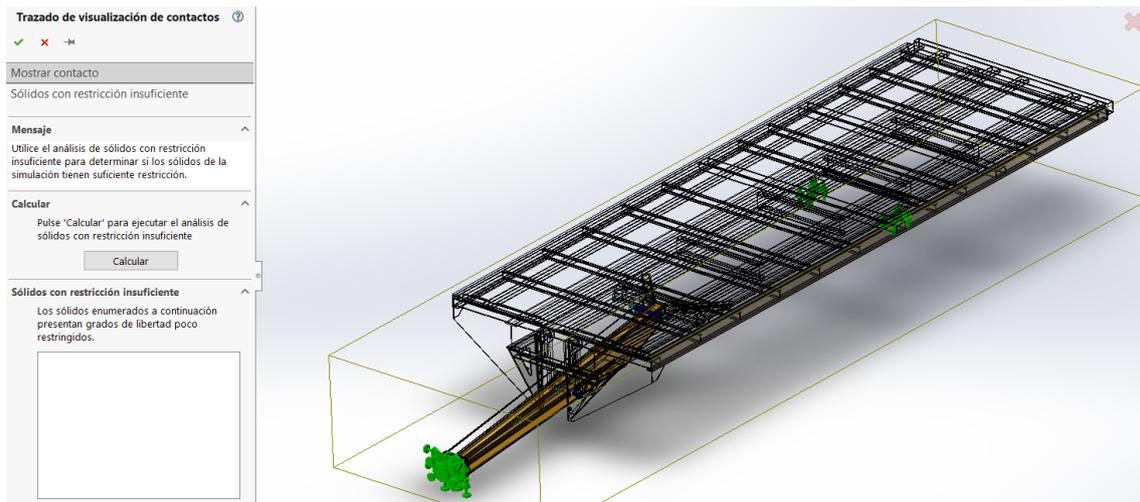


Figura 74: Análisis de las libertades de las piezas del chasis

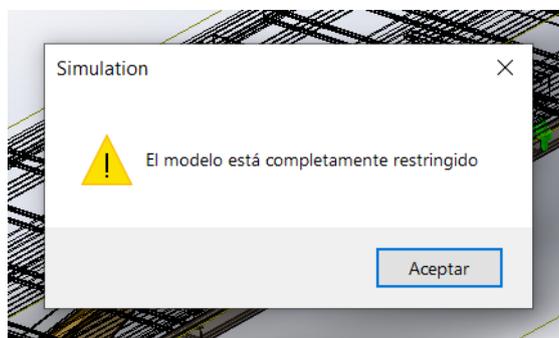


Figura 75: Mensaje de confirmación de que el chasis no tienen piezas con libertades

Para este ensayo he dibujado las piezas de tal forma que todas se llegan a encontrar de una forma “ideal”.

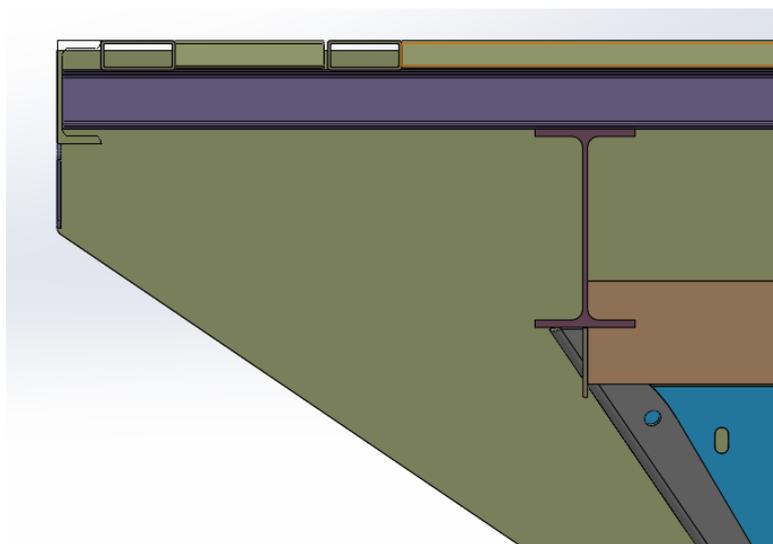


Figura 76: Detalle del ajuste de los encajes en 3D

Cuando se analice una estructura que se ha dibujado pensando en su fabricación y no en su análisis estático, seguramente, tenga holguras y encajes sobredimensionados para facilitar el montaje en la realidad. Cuando esto pase, el programa detectará que estas piezas no están unidas entre sí. Se puede definir esa unión manualmente.

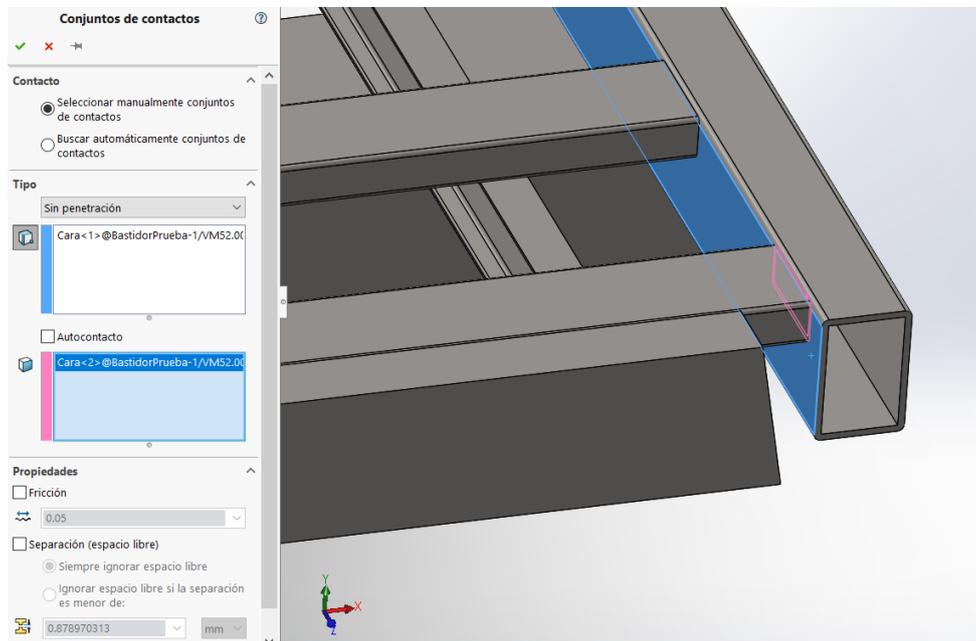


Figura 77: Definición de la unión entre dos caras separadas

Una vez que se sabe que no tenemos piezas con libertades y la malla se ha realizado correctamente. Se obtienen los resultados.

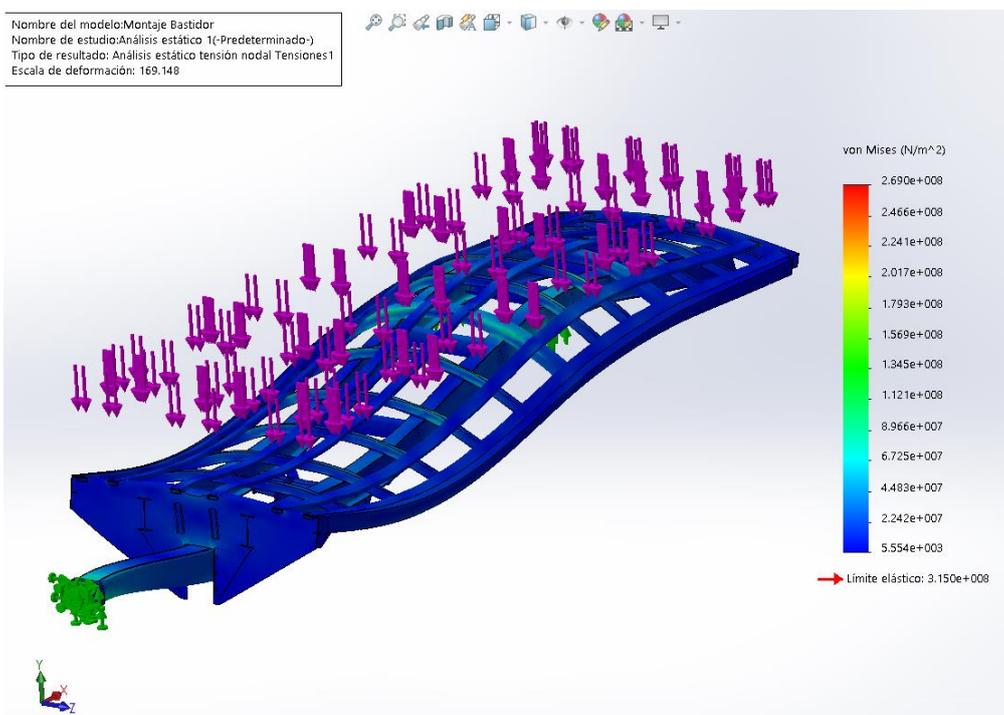


Figura 78: Reparto de cargas del chasis en modelo volumétrico

Nombre del modelo: Montaje Bastidor  
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)  
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
 Escala de deformación: 169.148

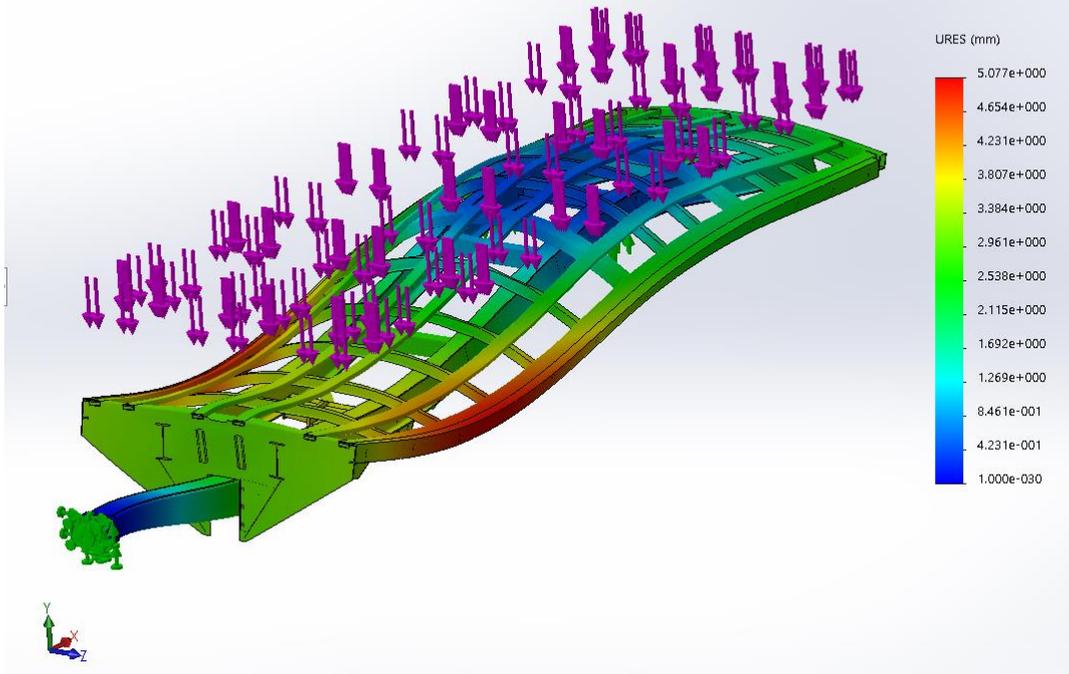


Figura 79: Desplazamientos del chasis en modelo volumétrico

Nombre del modelo: Montaje Bastidor  
 Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)  
 Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
 Criterio: Tensiones von Mises máx.  
 Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.2

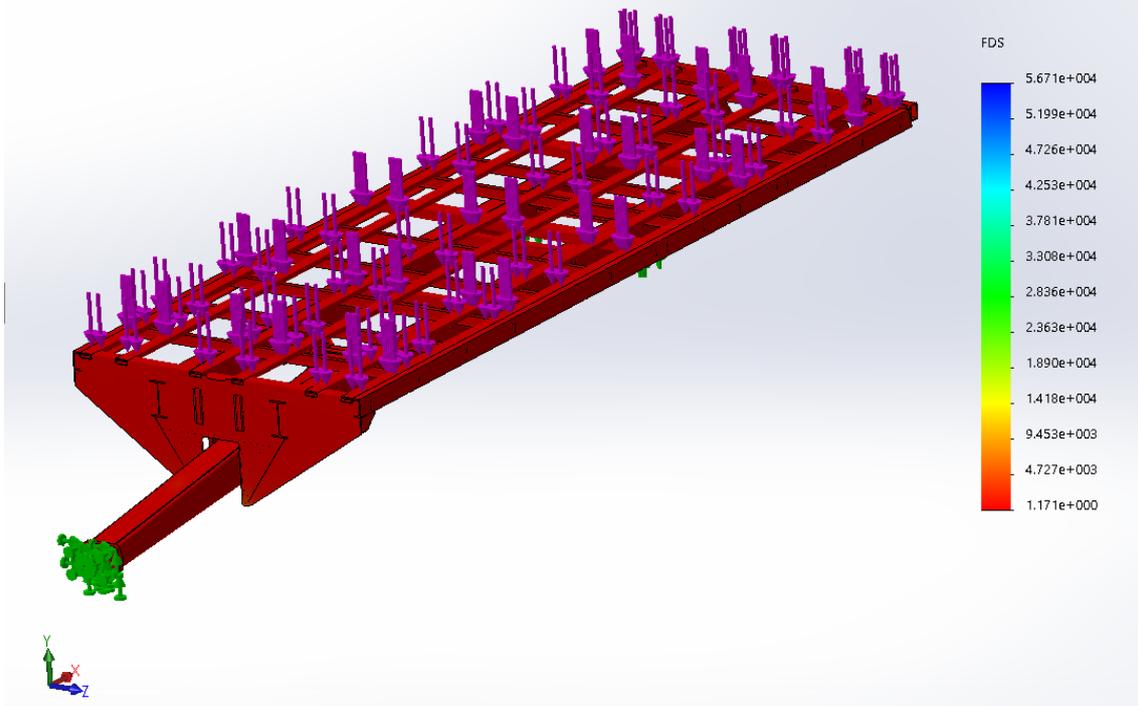


Figura 80: Factor de seguridad del chasis en modelo volumétrico

Se puede observar como las zonas más críticas son las exteriores que están a la altura del anclaje de la lanza. En la realidad esta es así, hasta tal punto que muchas averías del pasado se daban en esa zona. Para el montaje, también se observa el factor de seguridad, este nos dice por cuanto se tiene que multiplicar la carga para que rompa.

Para realizar el pandeo, como ya se ha visto en los ensayos anteriores, se vuelve a realizar otro ensayo independiente en el programa. Se introducen las mismas condiciones de contorno y se le selecciona que nos de tres formas de pandeo.

Se observa que, en todas las formas de pandeo, el factor de carga o pandeo es mayor que 1.

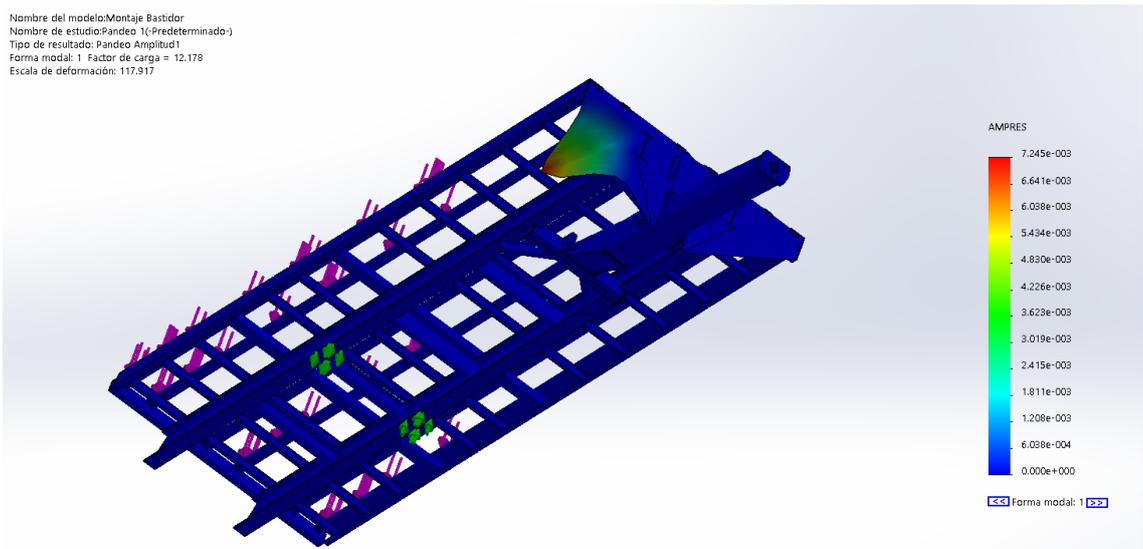


Figura 81: Forma modal 1 del chasis en modelo volumétrico

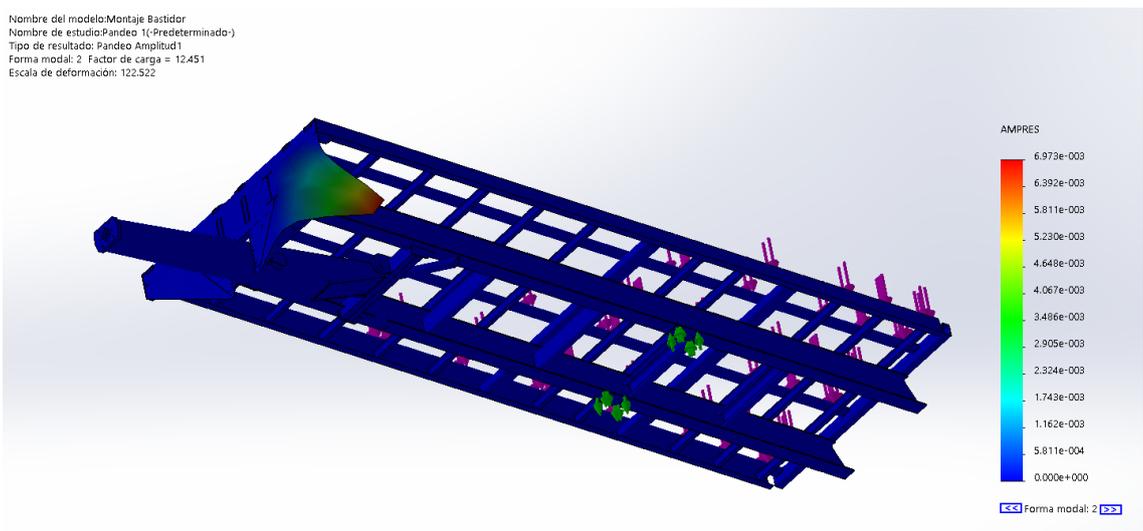


Figura 82: Forma modal 2 del chasis en modelo volumétrico

Nombre del modelo: Montaje Bastidor  
 Nombre de estudio: Pandeo 1(-Predeterminado-)  
 Tipo de resultado: Pandeo Amplitud1  
 Forma modal: 3 Factor de carga = 17.697  
 Escala de deformación: 201.164

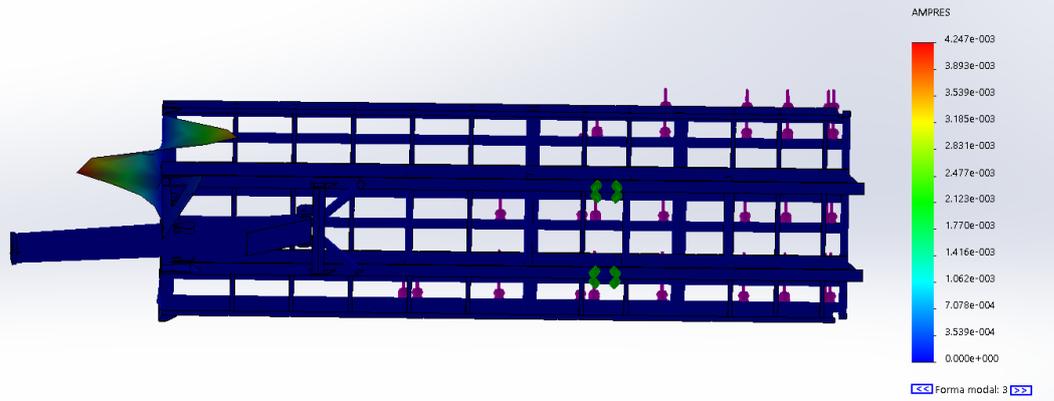


Figura 83: Forma modal 3 del chasis en modelo volumétrico

Con el fin de comparar el análisis en base a un dibujo hecho con modelo volumétrico y otro con superficial. El mismo programa nos facilita un informe automático de cada ensayo.

#### Información de malla - Detalles

Número total de nodos	300524
Número total de elementos	156396
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:11:26
Nombre de computadora:	

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000e+000mm Nodo: 288861	5.077e+000mm Nodo: 60358

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	9.875e-009 Elemento: 150431	7.100e-004 Elemento: 150120

Modo n°.	Factor de carga
1	<b>12.178</b>
2	<b>12.451</b>
3	<b>17.697</b>

Ahora se pasa a realizar el mismo ensayo con el ensamblaje en modelo superficial.

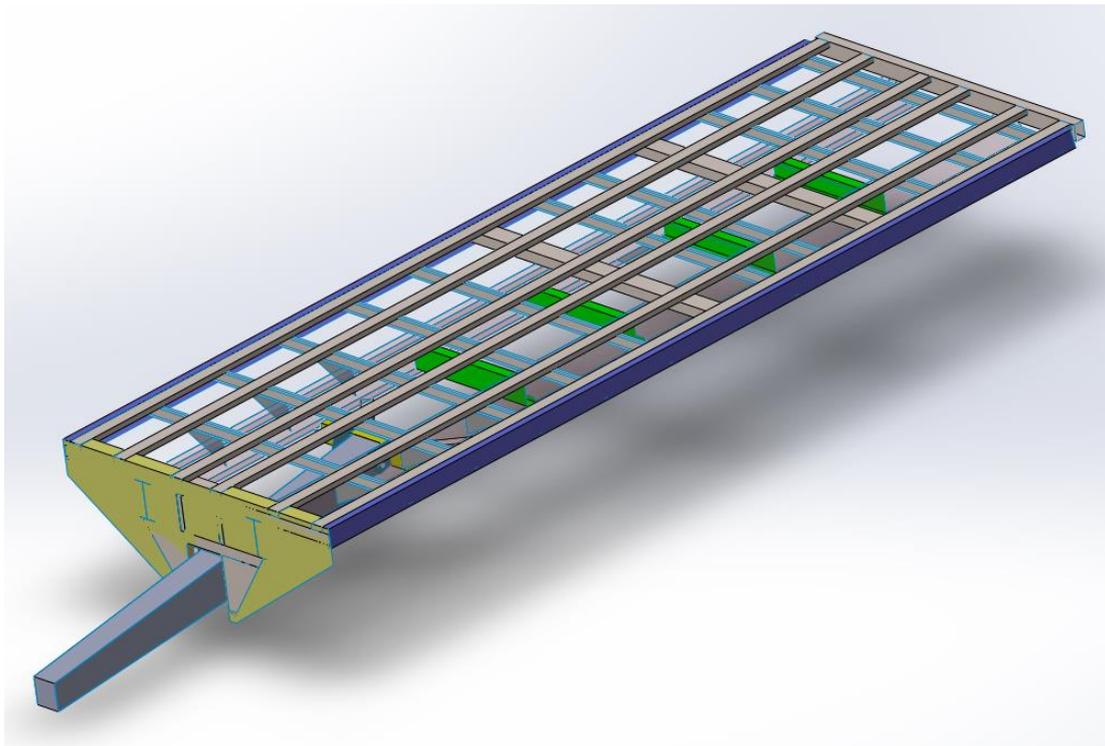


Figura 84: Vista general del montaje del chasis en modelo superficial

Primero se introducen los materiales de todas las piezas

Material

Propiedades Tablas y curvas Apariencia Rayado Personalizado Datos de aplica

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

Unidades: SI - N/m<sup>2</sup> (Pa)

Categoría: DIN Acero (estructural)

Nombre: 1.0570 (S355J2G3)

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción: S152-3N

Origen: Límite de tracción y límite elástico para 63 < t <= 100 m

Sostenibilidad: Definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.100000031e+011	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	7.9e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	7800	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	490000000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	315000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	1.1e-005	/K
Conductividad térmica	14	W/(m·K)

Haga clic aquí para acceder a más con el portal web de materiales de SOLIDWORKS.

Aplicar Cerrar Guardar Config... Ayuda

Figura 85: Definición del material de las piezas del chasis en modelo superficial

Como ya se ha visto en el ensayo de verificación, en este caso, se aplica el espesor de las superficies. Se hace en correlación a como se ha dibujado las piezas. Por ejemplo, se han dibujado las caras exteriores de los tubos. Por lo que el espesor se aplicará hacia el interior de las piezas, como se puede ver en la Figura 86 y 87.

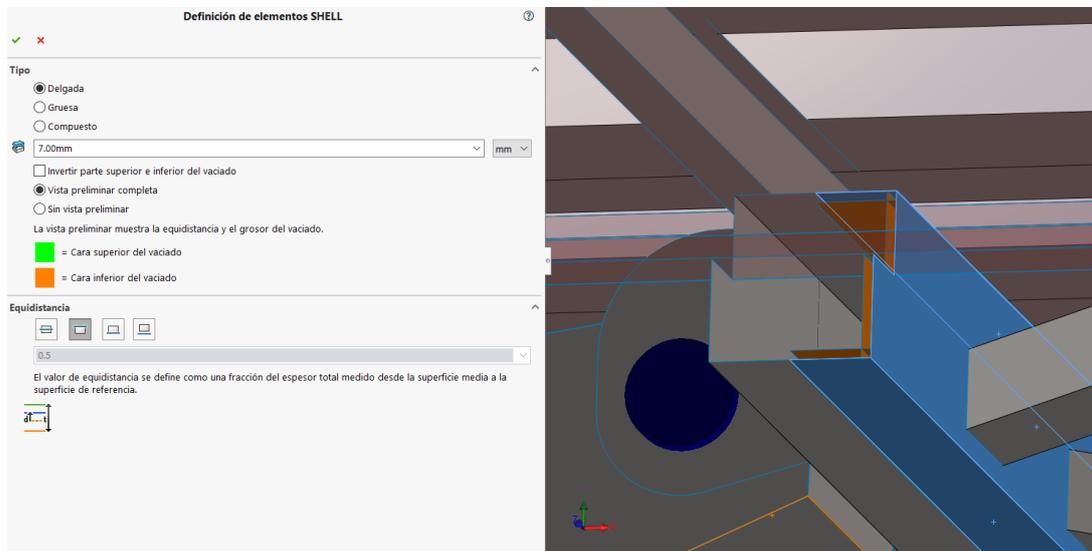


Figura 86: Definición del espesor de las piezas del chasis en modelo superficial

Se aplican los espesores hacía el interior del tubo.

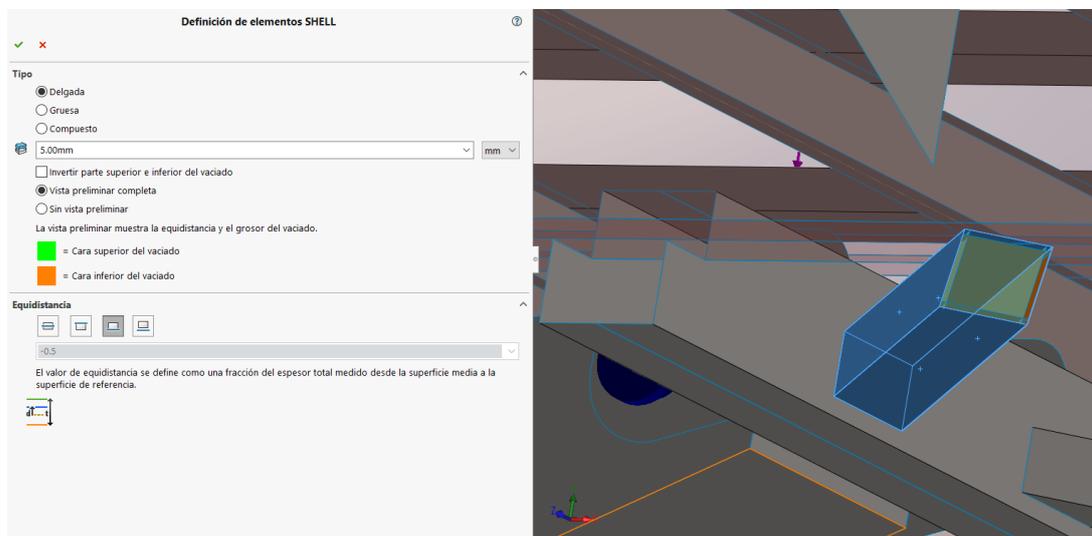


Figura 87: Definición del espesor de un tubo en modelo superficial

Se definen las uniones entre piezas. Todas las piezas en contacto crearán uniones rígidas. Las que no están en contacto necesitarán ser definidas.

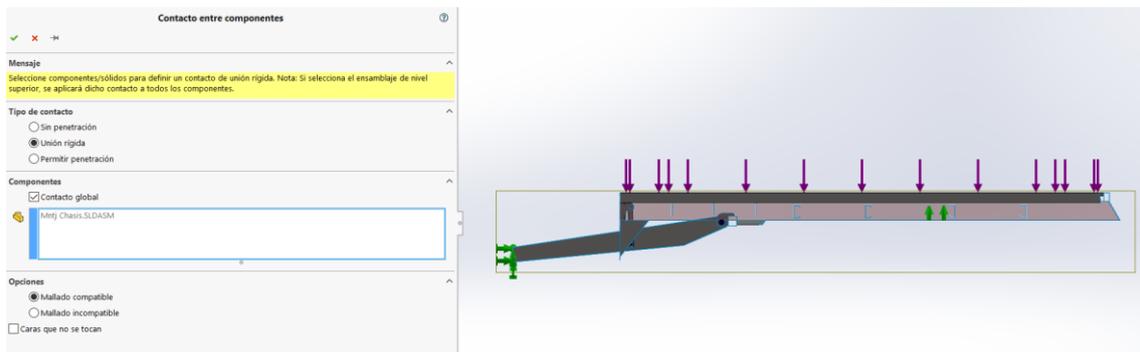


Figura 88: Definición de la unión entre piezas en contacto en modelo superficial

Y la lanza y los cilindro de ella están unidos con bulones y no están en contacto en el diseño en 3D. Se definirá esta unión con una unión tipo pasador.

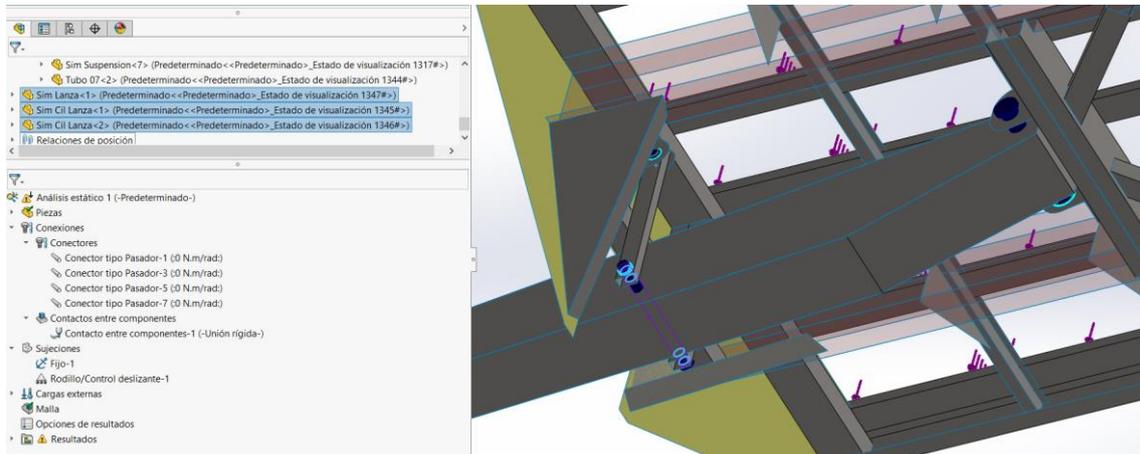


Figura 89: Definición de las uniones tipo bulón en modelo superficial

Ahora se definen los apoyos. Los mismo que en el otro ensayo. El primero, la punta de la lanza.

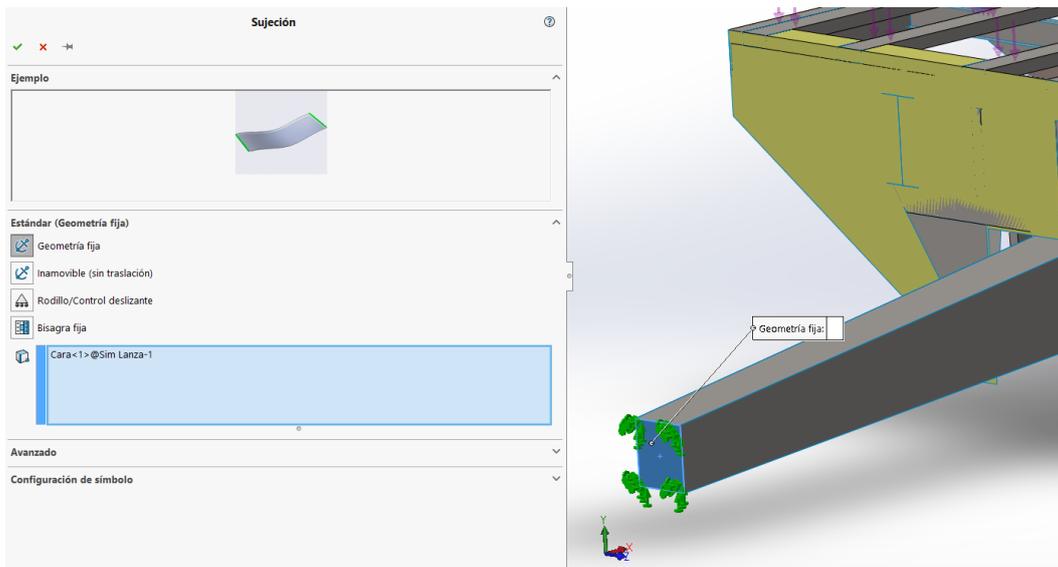


Figura 90: Definición del apoyo de la lanza en modelo superficial

Y el otro el apoyo móvil que simula la suspensión

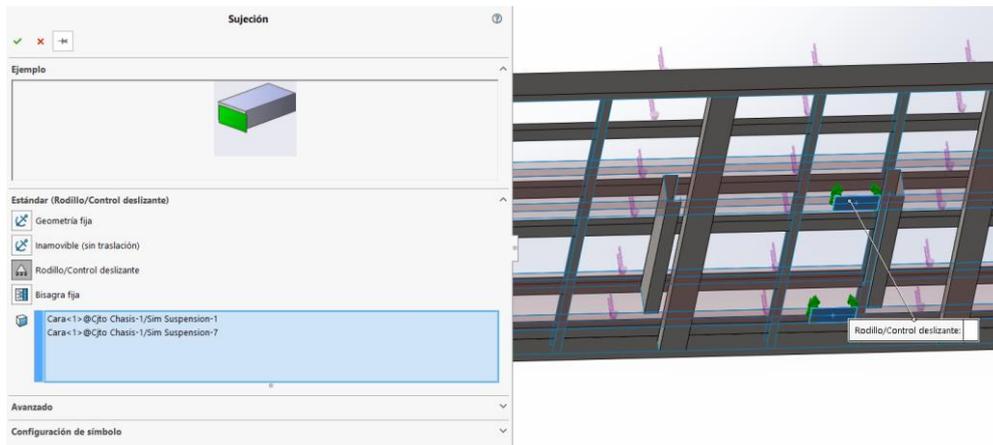


Figura 91: Definición del apoyo que simula la suspensión en modelo superficial

El siguiente paso es aplicar la carga, esta será la misma que en el ensayo anterior.

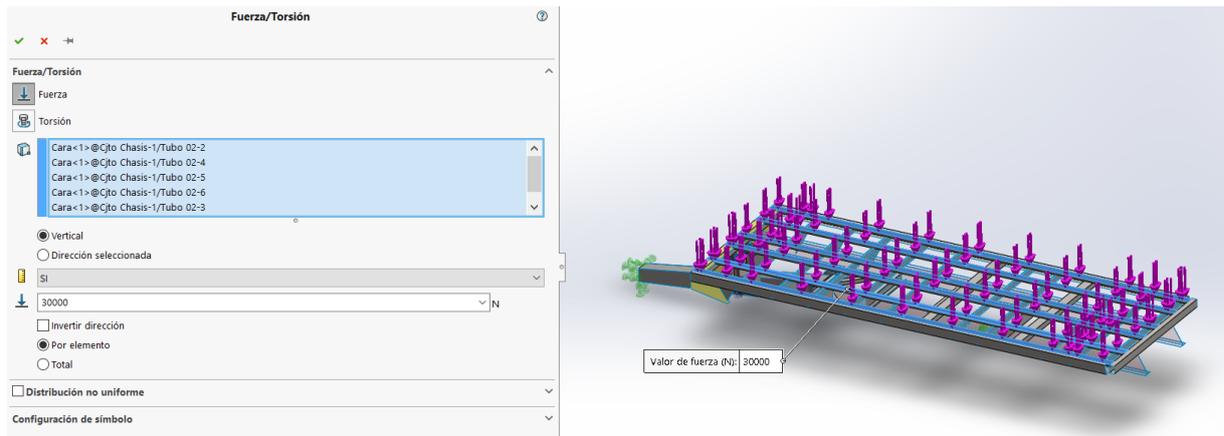


Figura 92: Definición de las cargas del chasis en modelo superficial

Se realiza el mallado. De la misma manera que nos ha pasado en el ensayo de las vigas. Para un diseño en modelo volumétrico se recomienda un mallado en curvatura mientras que para un modelo superficial es mejor un mallado estándar.

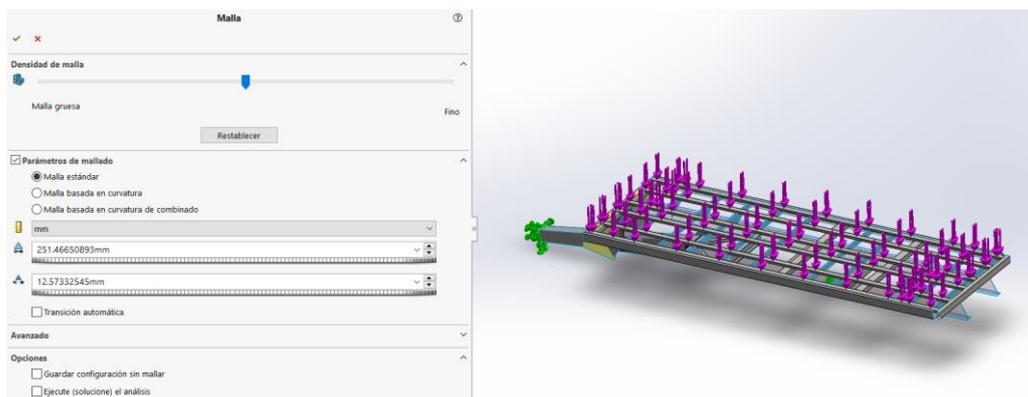


Figura 93: Características del mallado en modelo superficial

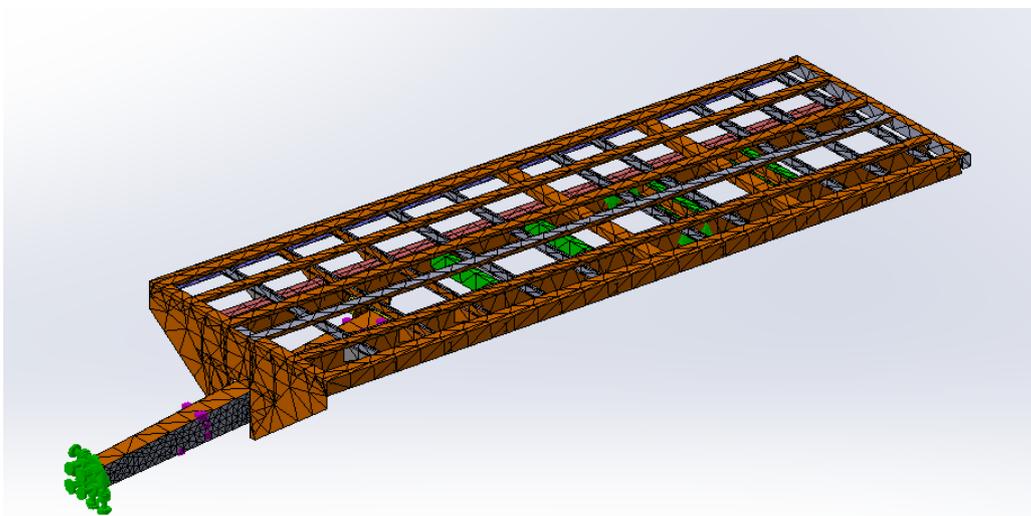


Figura 94: Malla del chasis en modelo superficial

En un modelo superficial también se puede realizar el análisis del ensamblaje. Si hay una pieza con libertades, el problema dará error y no podrás obtener los resultados.

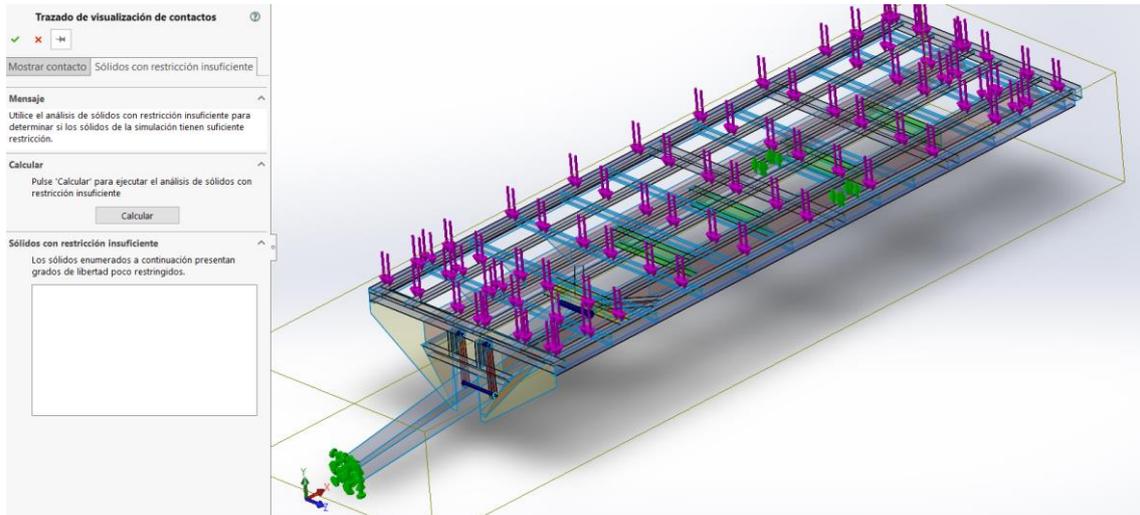


Figura 95: Análisis de piezas con libertades en el chasis en modelo superficial

Una vez que se sabe que no hay fallos y se tiene un mallado correcto. Se obtienen los resultados. Se pueden observar el reparto de cargas en la Figura 96, los desplazamientos en la Figura 97 y el factor de seguridad en la Figura 98.

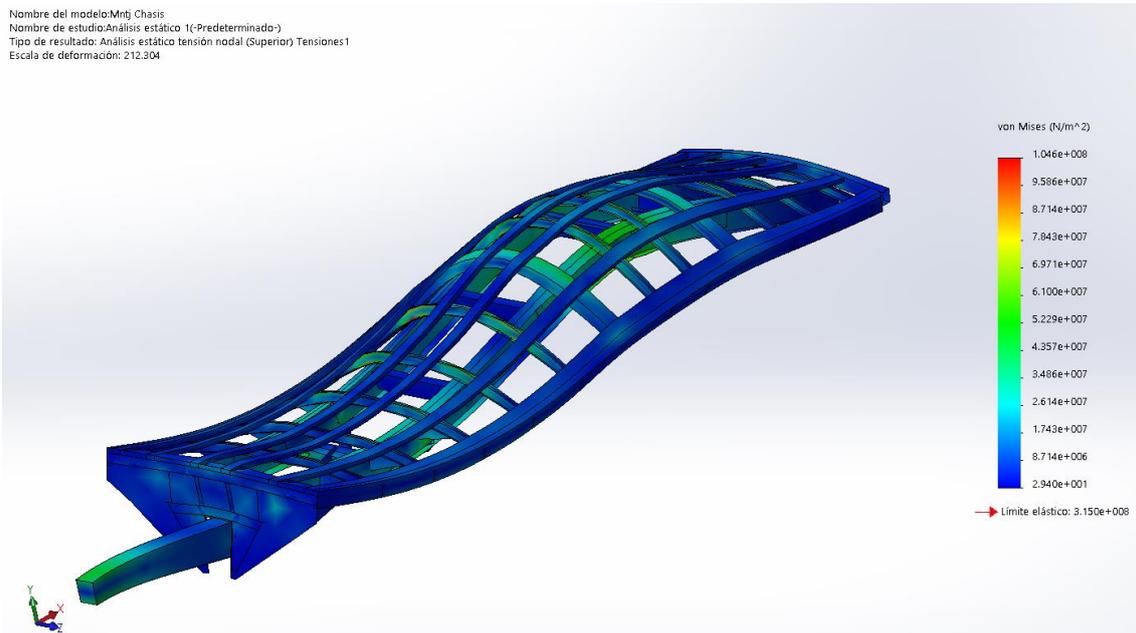


Figura 96: Reparto de cargas del chasis en modelo superficial

Nombre del modelo: Mntj Chasis  
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1  
Escala de deformación: 212.066

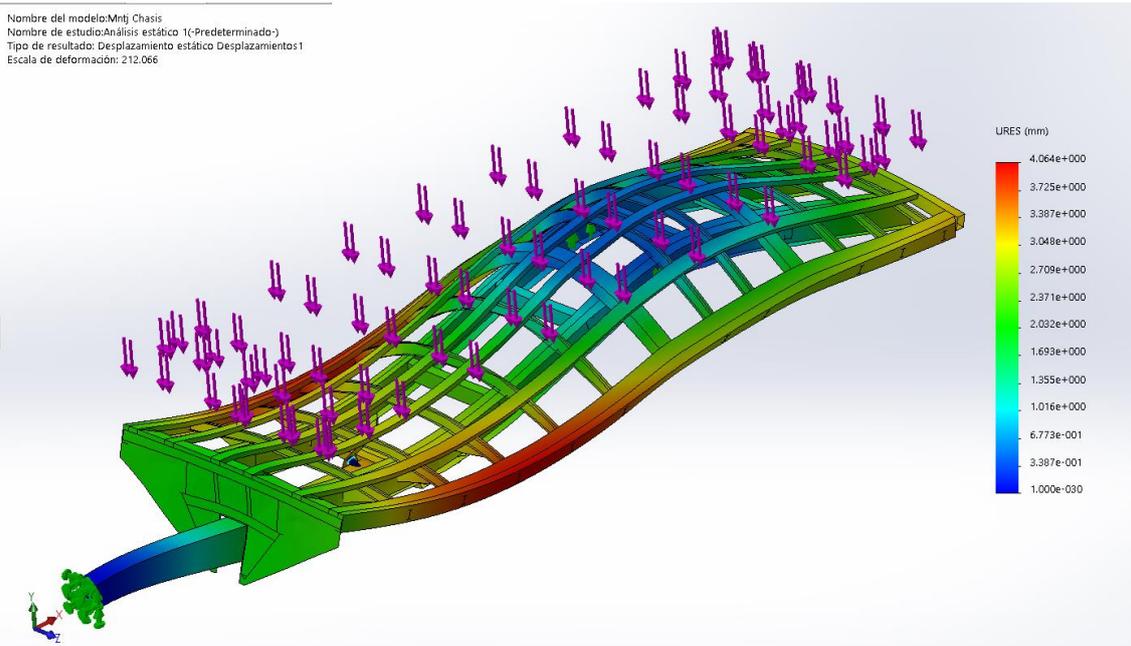


Figura 97: Desplazamientos del chasis en modelo superficial

Nombre del modelo: Mntj Chasis  
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1  
Criterio: Tensiones von Mises máx.  
Distribución de factor de seguridad: FDS min = 3

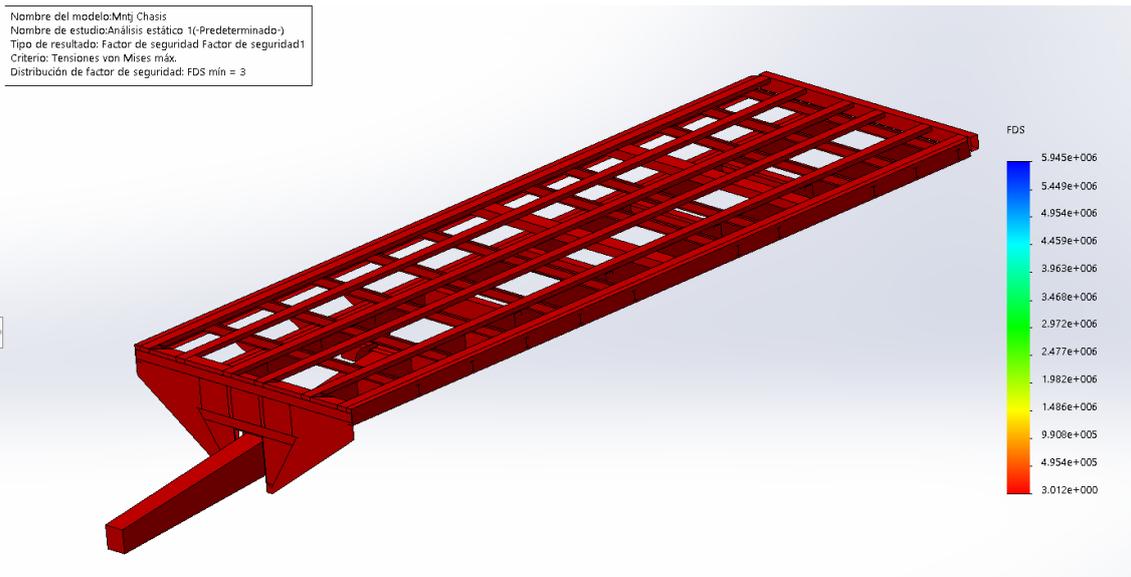


Figura 98: Factor de seguridad del chasis en modelo superficial

De la misma manera que se ha hecho en el modelo volumétrico, se vuelve a realizar otro ensayo con las mismas condiciones de contorno, pero esta vez, un ensayo tipo pandeo. Obteniéndose 3 formas de pandeo. De la misma forma que en el ensayo anterior, todas las formas de pandeo nos dan un factor de carga o de pandeo mayor que 1.

Nombre del modelo: Mntj Chasis  
 Nombre de estudio: Pandeo 1 (Predeterminado)  
 Tipo de resultado: Pandeo Amplitud 1  
 Forma modal: 1 Factor de carga = 25.011  
 Escala de deformación: 101.176

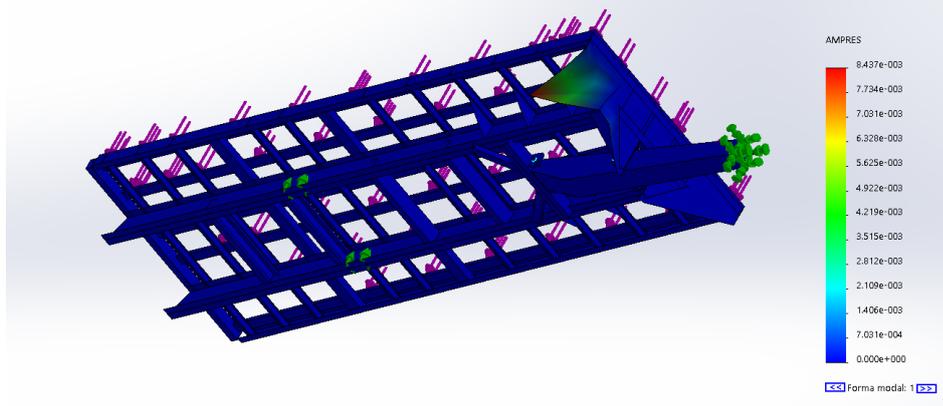


Figura 99: Forma modal 1 del chasis en modelo superficial

Nombre del modelo: Mntj Chasis  
 Nombre de estudio: Pandeo 1 (Predeterminado)  
 Tipo de resultado: Pandeo Amplitud 1  
 Forma modal: 2 Factor de carga = 25.441  
 Escala de deformación: 100.637

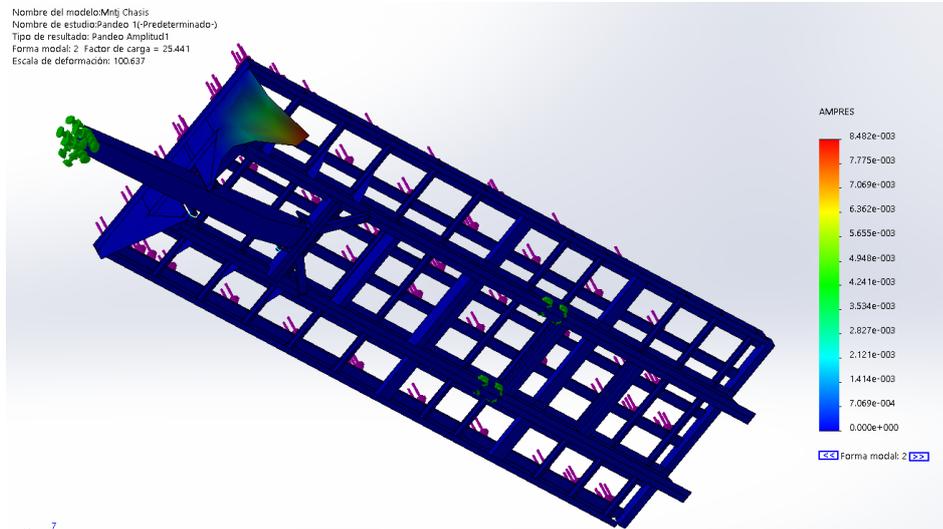


Figura 100: Forma modal 2 del chasis en modelo superficial

Nombre del modelo: Mntj Chasis  
 Nombre de estudio: Pandeo 1 (Predeterminado)  
 Tipo de resultado: Pandeo Amplitud 1  
 Forma modal: 3 Factor de carga = 20.159  
 Escala de deformación: 234.895

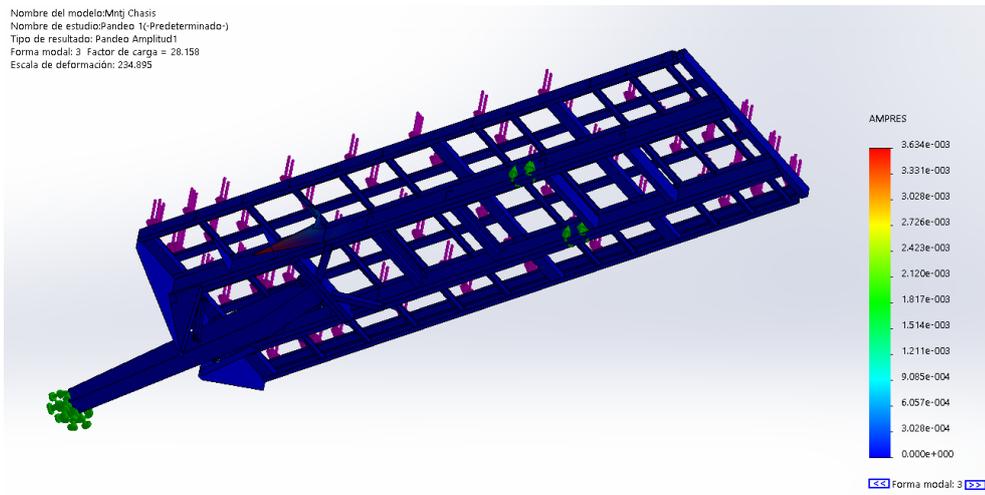


Figura 101: Forma modal 3 del chasis en modelo superficial

También se generan datos de los informes que nos genera el programa automáticamente.

Número total de nodos	10254
Número total de elementos	4398
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:01:32
Nombre de computadora:	

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000e+000mm Nodo: 9370	4.063e+000mm Nodo: 3188

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	0.000e+000 Elemento: 4291	2.683e-004 Elemento: 1491

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Tensión de von Mises máx.	3.052e+000 Nodo: 1209	5.940e+006 Nodo: 9851

Modo n°.	Factor de carga
1	25.011
2	25.441
3	28.158



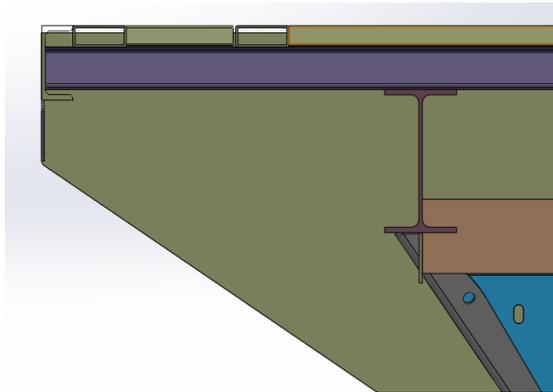
## Comparativa entre ensayos

Una vez realizados los dos ensayos, se comparan en varios aspectos. Estos puntos de comparación serán: calidad del diseño, exigencia y agilidad computacional, y los resultados finales de los ensayos.

Primero, se tiene en cuenta la calidad del diseño. El diseño en 3D en modelos volumétricos intenta ser lo más cercano a la realidad posible. Para estos diseños se tienen en cuenta muchos factores que se pueden dar a la hora de la fabricación.

Estos diseños contienen holguras y ajustes que dentro del diseño pueden no tener sentido. Pero a la hora de llevar nuestro diseño a la fabricación, estos ajustes son necesarios para un montaje mucho más sencillo.

Es completamente distinto diseñar pensando en fabricar que en realizar un ensayo dentro del software. Como ya se ha visto antes, el diseño sufrirá modificaciones para facilitar el cálculo del ensayo en el ordenador. Si no se crea otra versión del diseño con los ajustes “perfectos” y sin holguras entre piezas, se dificulta la ejecución del ensayo. El software no detectará bien el contacto entre piezas y nos reportará que tiene piezas con libertades y no nos proporcionará ningún resultado o, en el mejor de los casos, un resultado no válido.



*Figura 102: Detalle del ajuste entre una IPE y una UPN*

También, se obliga a definir superficies de contacto manualmente, que en el diseño no los están. Este tipo de acciones nos derivará resultados menos exactos, ya que el programa entiende que la totalidad de las caras están en un contacto fijo, y puede ser que sólo lo estén en una sección parcial de las caras. Si las caras estuvieran en contacto en el diseño, nada de esto sería necesario y el resultado obtenido es mucho más próximo a la realidad.

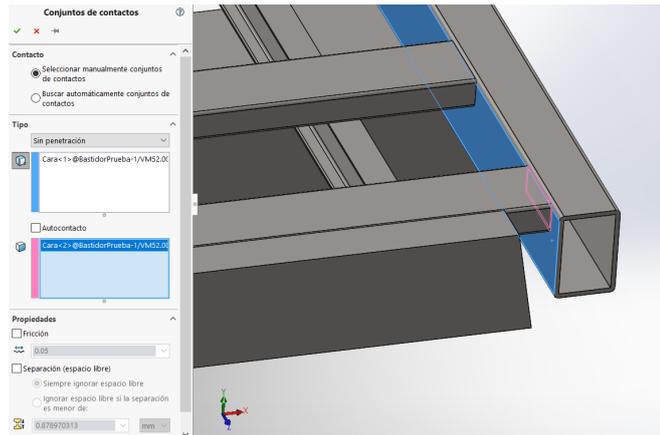


Figura 103: Definición de unión entre caras que no están en contacto

Otro aspecto a tener en cuenta cuando se definen contactos entre caras es que se aumentan considerablemente la carga computacional del ensayo. Si el cálculo de un ensayo es muy exigente para nuestro ordenador, ampliando las probabilidades de fallos computacionales y el tiempo de carga será mucho mayor.

En cuanto al diseño en modelo superficial, este es una aproximación a la realidad. Tiene el coste de tener que volver a dibujar todo el 3D en el modelo superficial con la pérdida de detalles que los modelos volumétricos te ofrecen.

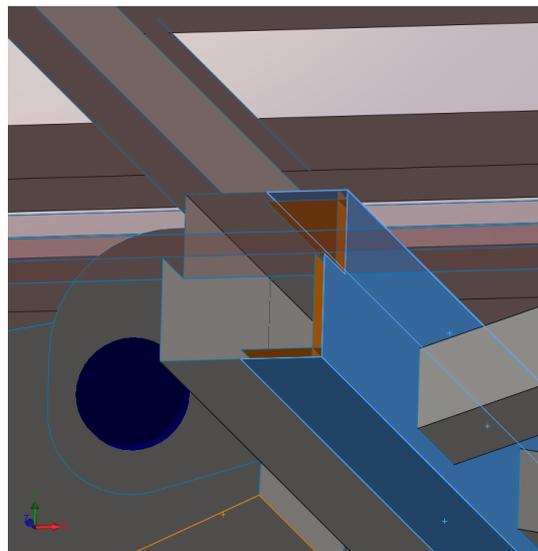


Figura 104: Detalle de diseño en modelo superficial

El lado positivo del diseño en modelo superficial es que el coste computacional es mucho menor. Hay menos posibilidades de fallos de cálculos. Esto hace que el posible rediseño y variación de piezas y ensamblajes con el fin de optimizar el comportamiento de la estructura, es mucho más ágil.

Por otro lado, los resultados obtenidos de un ensayo en modelos superficiales serán menos próximos a la realidad que los obtenidos en modelos volumétricos. Como ya se ha dicho, los diseños son aproximaciones muy genéricas de la realidad.

Se puede ver la diferencia entre la carga computacional en los informes que nos genera propio software.

Los datos de la malla del ensayo en modelo volumétrico:

<b>Número total de nodos</b>	300524
<b>Número total de elementos</b>	156396
<b>Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):</b>	00:11:26

Los datos de la malla del ensayo en modelo superficial:

<b>Número total de nodos</b>	10254
<b>Número total de elementos</b>	4398
<b>Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):</b>	00:01:32

Se puede apreciar que número de nodos y elementos es mucho menor en un modelo superficial y, por tanto, el tiempo que demanda el ordenador para generar la malla en un modelo volumétrico es mayor que en superficial.

Esto es el resultado de todos los factores que se han hablado antes. El 3D en un modelo superficial es una aproximación a la realidad mientras que en un modelo volumétrico intentar ser lo más exacto posible. En modelos volumétricos es más probable que se necesite de definir uniones entre piezas de una forma manual.

En cuanto a los resultados. Se comparan directamente los máximos valores obtenidos en ambos modelos. En el modelo superficial obtenemos un valor máximo de concentraciones de tensiones de  $1,046 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , mientras que en el volumétrico es de  $2,69 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ .

Los resultados máximos son distintos, pero dentro de la misma escala de valores. También se aprecia que los resultados obtenidos en modelos volumétricos tienen una mayor variabilidad mientras que en superficiales, los valores mínimos y máximos son más próximos.

Esto se debe a que el cálculo obtenido en modelos volumétricos tiene en cuanto muchos más detalles geométricos, como por ejemplo radios entre superficies, que hace que los resultados sean más próximos a la realidad.

También, se observa que los puntos de mayor carga son los mismos para ambos ensayos. Se ve a la izquierda el ensayo en el modelo volumétrico y a la derecha el de superficies.

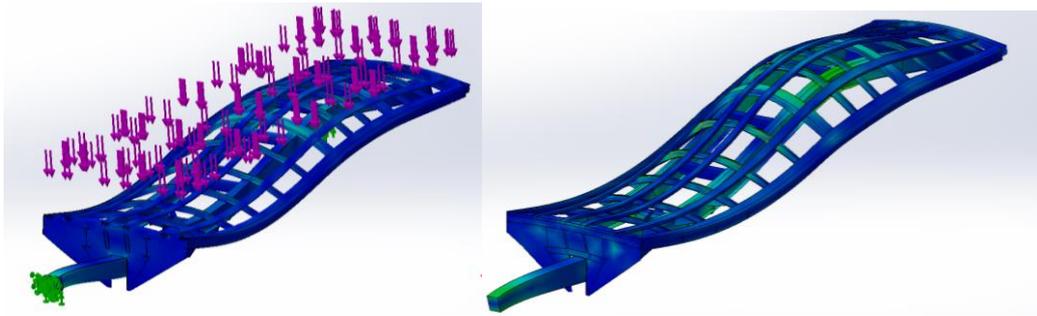


Figura 105: Comparativa de las cargas en los modelos

Se puede observar que el reparto de colores es similar y el punto de mayor carga es la unión entre la lanza y el chasis. Esto es así en la realidad, es una zona conflictiva y se refuerza siempre esa unión.

Estos datos son importantes, ya que más allá del dato numérico, el conocimiento de las zonas más débiles para poder reforzarlas alarga la vida del vehículo y mejor su comportamiento.

En cuanto a los desplazamientos. Se comparan de la misma manera. Primero se observan los resultados numéricos. Los desplazamientos máximos en el modelo superficial con de 4,064 mm y en el volumétrico es de 5,077 mm. Estos datos son mucho más parejos y desarrollados a lo largo de la estructura.

De la misma manera Se pueden comparar las zonas de mayor y menores desplazamientos. Se ven que los puntos de mayor desplazamiento también son los mismos:

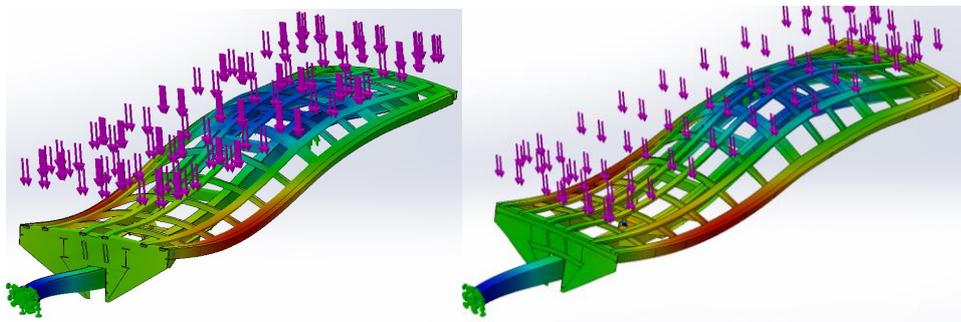


Figura 106: Comparativa de los desplazamientos en los modelos

A la izquierda se observan los desplazamientos en el modelo volumétrico y a la izquierda en el superficial. Se ve que la zona que más desplazamientos sufre son las zonas laterales que están a la altura de la unión con la lanza.

Esto también se corresponde con la realidad. Estas zonas son las más delicadas, como se ha hablado antes, estos vehículos tienen grandes voladizos debido a las características del mismo. Reducir los desplazamientos tiene como objetivo disminuir esos voladizos. Hay ciertos vehículos que imposibilitan hacerlo por lo que se han añadido cartabones y otro tipo de piezas para reforzar esas zonas.

En cuanto al factor de carga. Prácticamente sólo nos interesa el FDS min.

Nombre del modelo: Montaje Bastidor Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-) Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1 Criterio: Tensiones von Mises máx. Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 1.2	Nombre del modelo: Mntj Chasis Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-) Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1 Criterio: Tensiones von Mises máx. Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 3
--	---

Figura 107: Comparativa de los factores de carga

Se obtiene un FDS min de 1,2 en el modelo volumétrico y de 3 en el superficial. Estos factores se dan en los puntos de mayor concentración de tensiones. Este número nos indica por cuanto hay que multiplicar a la carga que se ha introducido en los ensayos para provocar una rotura del sistema. Este número es mucho mayor en el modelo superficial ya que, como se ha visto antes, el diseño es una aproximación a la realidad. Es significativo lo mucho que se empieza a diferenciar este valor a medida que el ensamblaje de piezas se vuelve mayor y más complejo.

Por último, se comparan los resultados obtenidos del ensayo de pandeo. Se tienen 3 formas de pandeo en cada ensayo. Con este ensayo se confirman que las zonas más débiles para el pandeo son las mismas en ambos ensayos.

Estas son las zonas más críticas en el ensayo con modelos volumétricos:

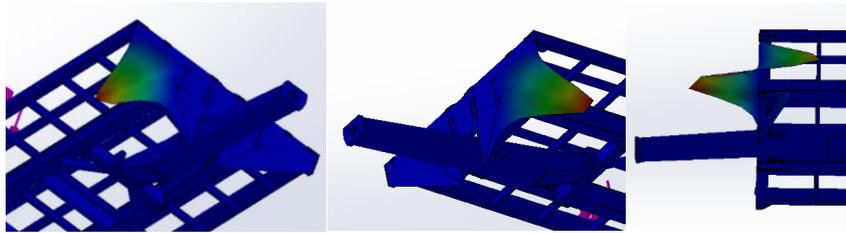


Figura 108: Zonas de Pandeo del modelo volumétrico

Todas estas formas de pandeo tienen un factor de pandeo mayor que uno. Estos factores son: 12,178 para la primera forma, 12,451 para la segunda y 17,697 para la tercera.

De la misma forma, se pueden ver las 3 formas de pandeo del ensayo del modelo superficial:

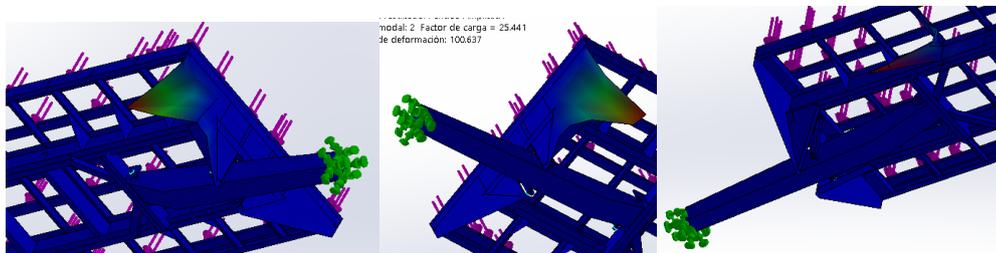


Figura 109: Zonas de Pandeo del modelo superficial

En ambos ensayos, se obtienen formas de pandeo con factor de pandeo mayor que uno. Estos factores son: 25,011 para la primera forma, 25,441 para la segunda y 28,158

para la tercera. Lo más importante es que confirma que las zonas más débiles al pandeo son las mismas. Esto nos da una información importante para poder saber otro posible punto débil de la estructura.

# Conclusiones

Los objetivos que se tenían al principio del trabajo eran:

- a) Aprender a usar el módulo de análisis de estructuras de SolidWorks.
- b) Analizar y comparar la estructura diseñada en modelo volumétrico y superficial.
- c) Obtener la mayor información posible sobre la estructura, como puntos débiles, de máxima tensión o críticos.

El trabajo desarrolla un tutorial bastante completo en el que se desarrollan todos los pasos necesarios para analizar una estructura con SolidWorks.

Los pasos a seguir son:

- a) Introducir los materiales de las piezas. Si es un modelo superficial, se introducirán también el espesor de las superficies de cada pieza.
- b) Se definen las uniones entre las piezas que forman una estructura.
- c) Introducir los apoyos de la estructura.
- d) Introducir las cargas que posee la estructura.
- e) Generar la malla.
- f) Realizar diversas comprobaciones que confirmen un análisis con éxito.
- g) Realizar el análisis de la estructura.
- h) Analizar los resultados.

Se ha analizado la misma estructura en modelo superficial y volumétrico con la intención de comparar el análisis sobre ambos modelos.

Los principales puntos de comparación son:

- a) La exactitud. Un modelo volumétrico siempre será más exacto que uno superficial. El nivel de detalles de las piezas y las uniones entre ellas es mucho mayor en este modelo.
- b) La complejidad. El modelo volumétrico es bastante más sencillo e intuitivo que el superficial. Para dibujar en el modelo superficial hay que tener en cuenta que se añadirán los espesores de las superficies, esto obliga a tener en cuenta cómo se van a definir estos espesores y las uniones entre las piezas. En un modelo superficial las uniones entre piezas se pueden volver más complejas, es más común que se tengan que definir estas uniones manualmente que en el modelo volumétrico.
- c) La eficiencia. La carga computacional que se necesita para el modelo volumétrico es mucho mayor que en el superficial. Este es el punto positivo del modelo superficial, ya que en este se pueden hacer modificaciones sobre una estructura y ver cómo estas modifican su comportamiento de una manera mucho más ágil y eficiente.

En resumen, el modelo volumétrico es mejor que el superficial en todos los aspectos tanto en exactitud como en facilidad de ejecución. El modelo superficial es más rápido y eficiente.

De los análisis que se han desarrollado tanto en el modelo volumétrico como en el superficial de la misma estructura se obtienen unos resultados.

Se puede observar como ambos análisis dan los mismos puntos críticos, aunque con distintos valores. Las zonas más críticas de la estructura son:

- a) Las zonas de anclaje de la lanza.

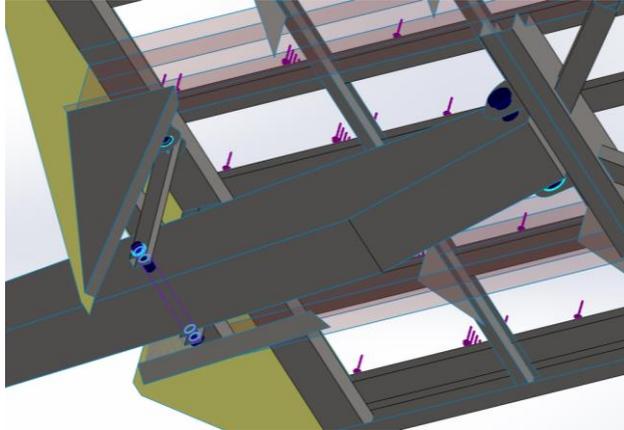


Figura 110: Vista detalle del anclaje de la lanza

- b) Los voladizos laterales del vehículo.

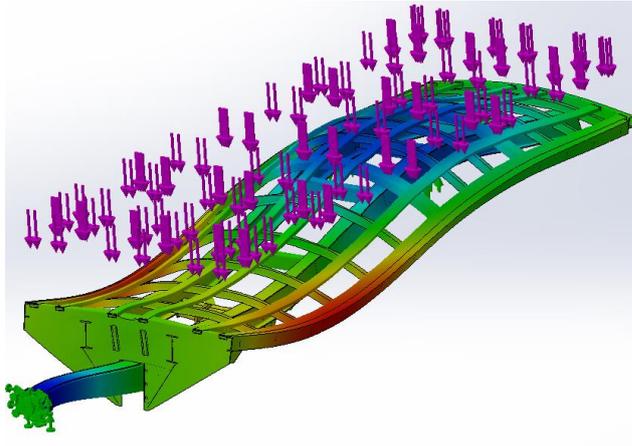


Figura 111: Desplazamientos de la estructura

- c) La pieza que hace de unión fronta del chasis.

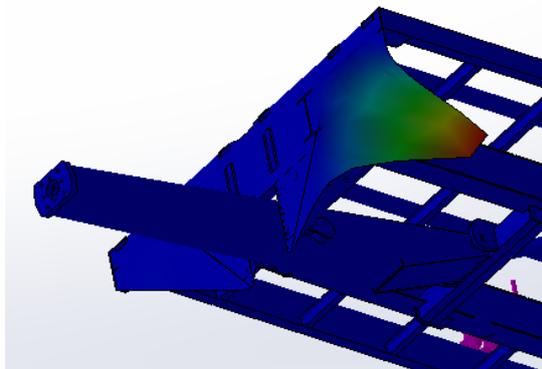


Figura 112: Vista detalle del pandeo de la estructura

Estas conclusiones se confirman con la experiencia real que se ha obtenido con años de desarrollo de este tipo de vehículos. Son las zonas más críticas, pero también son las que más se han reforzado.

La información que se obtiene de este tipo de análisis ayuda al desarrollo y mejora de la estructura. Este chasis se puede optimizar rediseñando muchas zonas del mismo. En el futuro se empezarán a usar este tipo de análisis y herramientas para realizar unos diseños más completos y eficientes

Rediseñar una estructura con todos estos datos facilita la búsqueda de un chasis más ligero y resistente. Aligerar un chasis no sólo aumenta a posibilidad de carga máxima del usuario del remolque si no que abarata la construcción del mismo. Se reduce la cantidad de materiales para la construcción del chasis.

Con este trabajo se puede mejorar una estructura en todos los aspectos:

- a) Estructural. Se puede lograr un chasis más resistente.
- b) Ligereza. Se busca aligerar el remolque para aumentar la capacidad de carga del usuario.
- c) Económico. Al reducir la cantidad de materiales, el chasis se vuelve más barato y más competitivo en el mercado.
- d) Medioambiental. Reducir el uso de materias primas reduce la contaminación y la explotación del ecosistema. Un menor impacto al medio ambiente no sólo reduce la contaminación, sino que mejora la imagen pública de la empresa.

A nivel económico, este TFG puede beneficiar mucho a la empresa. Los remolques se pueden volver más ligeros, más resistentes y más eficientes. Con todo lo que esto conlleva para el mercado: los remolques pueden llevar más carga, la empresa tiene una mejor imagen con respecto al medio ambiente y se abaratan costes.

## Consideraciones adicionales

Para la elaboración de este trabajo no se ha perjudicado el medio ambiente, ya que no se han empleado materiales contaminantes ni generado ningún tipo de desecho. Aunque el proceso de fabricación de remolques sea, en cierta medida, perjudicial para el entorno. Ya que se generan chatarras, gases y demás elementos contaminantes.

En el futuro, cuando se empiecen a emplear los conocimientos adquiridos en este trabajo. La optimización de la estructura reducirá los materiales necesarios para la construcción de estos chasis y, por lo tanto, también los residuos generados.

Otro detalle a tener en cuenta es que, al empezar a generar remolques más ligeros, la energía necesaria para moverlos será menor. La máquina tractora que arrastra estos vehículos demandará de menos combustibles fósiles para moverse en vacío. Evidentemente, esto sólo ocurrirá cuando el remolque vaya sin carga ya que, como hemos visto previamente, el usuario siempre buscará llevar la máxima carga arrastrada legal.

La inversión económica que se ha realizado para este TFG se prevé lo suficientemente rentable como para que sea necesaria o lógica. La estimación de coste de este trabajo se basa en las horas dedicadas a la realización del estudio que podemos estimar en unas 200 horas. Una vez realizado el primer estudio y absorbidos los conocimientos, la realización de otro nuevo estudio sobre otro chasis se estima en unas 10 horas.

El coste unitario de una hora de un ingeniero es aproximadamente de 11€/hora. Se imputa este TFG como coste inicial, lo que da unos 2200€. El coste por estudio de cada tipo de chasis es de 110€. Por lo que si durante un año se fabrican 40 vehículos y de 5 tipos distintos. El coste será de unos 2750€.

La estimación de ahorro en materiales por cada vehículo es de unos 400€. Si fabricamos esos 40 chasis, no ahorramos 16000€. El beneficio de este tipo de estudios para optimizar la estructura del chasis de un remolque es de 13250€ al año. Este beneficio indica lo importante que es tener toda la información posible sobre las estructuras a fabricar y, así, evitar sistemáticamente sobredimensionar.

Por otra parte, la imagen pública que se da en un sector en el que la inmensa mayoría de las empresas no realizan ningún tipo de estudios ni ensayos mejora sustancialmente. Los clientes se sienten más animados a adquirir un vehículo en una empresa en la que se analicen los chasis que en una en la que se trabaje únicamente con la experiencia.

En el futuro, se prevé que se analicen prácticamente todos los chasis que se tienen en catálogo. De esta manera se confirma el aumento de la capacidad técnica de la empresa, un mayor ahorro en materiales y unos remolques mucho más resistentes y ligeros.

# Bibliografía

[1] REGLAMENTO (UE) No167/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de febrero de 2013 relativo a la homologación de los vehículos agrícolas o forestales, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos

[2] SolidWorks2017 <https://www.solidworks.com/es>; consultado en 2021

[3] E. Oñate, «Calculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos», CIMNE,1992.

[4] A. Foces y J.A. Garrido, «Resistencia de Materiales», Ediciones Universidad de Valladolid; 1ª edición.

[5] S.Gomez, «SolidWorks Simularion», Ra-ma,2010