



# UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ingeniería Automotriz

## **Diseño de una Bicicleta de Carga Eléctrica (e\_cargo\_bike) para Movilidad Urbana en el Ecuador**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de Ingeniería Automotriz

Autor:

Luis José Reyes Tinoco

Director:

Ing. Robert Esteban Rockwood Iglesias Mgtr.

Cuenca – Ecuador

2025

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar con éxito esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mi familia, por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante en cada momento. A mis padres, quienes con su esfuerzo, sacrificio y ejemplo me enseñaron el valor del trabajo, la disciplina y la perseverancia.

Y, por supuesto, dedico este logro a mí mismo: al Luigi que entró a la universidad sin saber que significaba factorizar, y que ahora, después de tanto esfuerzo, café y noches sin dormir... se convirtió en ingeniero.

Esta tesis también está dedicada a todas las personas que han creído en mí y que, con sus palabras de aliento, me inspiraron a continuar y alcanzar este sueño que hoy representa un objetivo cumplido.

De manera especial, a quienes ya no forman parte de mi vida, pero estuvieron conmigo durante mucho tiempo: gracias por todo lo compartido; now we're just strangers with memories.

Finalmente, dedico estas páginas a una persona muy especial, cuya presencia significa mucho para mí. KL

## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a Dios por haberme acompañado en cada paso de este camino académico, brindándome salud, paciencia y fortaleza ante los desafíos, y por ayudarme a crecer cada día, a pesar de mis errores, buscando siempre ser un poco mejor que el día de ayer. A mis padres, por su apoyo incondicional, su amor y su confianza, pilares fundamentales que me impulsaron a seguir adelante.

Extiendo mi gratitud a mis profesores y compañeros de la carrera de Ingeniería Automotriz, por compartir sus conocimientos y experiencias, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional. De manera muy especial, expreso mi sincero agradecimiento al Ing. Robert Esteban Rockwood Iglesias, Mgtr., mi director de tesis, por su guía, compromiso y acompañamiento durante todo el desarrollo de este proyecto, aportando su conocimiento técnico y su orientación profesional en cada etapa del proceso.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, fueron parte de este logro, ya que cada uno aportó con su apoyo, motivación y confianza para que este proyecto se haga realidad.

## Resumen

Este proyecto desarrolla el diseño estructural de una bicicleta eléctrica de carga tipo long john orientada a la movilidad urbana sostenible en Ecuador. El estudio parte del análisis del contexto nacional, donde persisten desafíos relacionados con la congestión vehicular y la necesidad de implementar alternativas de transporte eficientes y de bajas emisiones.

Se diseñaron y evaluaron dos prototipos estructurales. El Prototipo 1 permitió validar el concepto inicial y analizar la resistencia del cuadro mediante simulaciones por elementos finitos (FEA), evidenciando limitaciones en rigidez, distribución de masas y comportamiento modal. Estos resultados guaron el desarrollo del Prototipo 2, rediseñado con tubos de acero, geometría optimizada y refuerzos estructurales en zonas críticas.

Las simulaciones realizadas en HyperMesh mostraron mejoras significativas: aumento de la frecuencia natural, reducción de deformaciones y mayor resistencia ante combinaciones de carga estática y dinámica (aceleración, frenado, curva e impactos). El diseño final alcanzó un factor de seguridad de 1.69, una rigidez torsional de  $1446 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$  y una rigidez flexionante de  $13\,684 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ , cumpliendo los criterios estructurales establecidos.

El estudio demuestra la viabilidad técnica de una bicicleta de carga eléctrica adaptada al entorno urbano ecuatoriano, y plantea bases para futuras validaciones físicas bajo normas como ISO 4210 y DIN 79010, orientadas a garantizar la seguridad y durabilidad del diseño.

**Palabras clave:** Bicicleta, Eléctrica, Carga, Estructural, Rigidez, Movilidad, FEA.

## Abstract

This project develops the structural design of a Long John-type electric cargo bike geared towards sustainable urban mobility in Ecuador. The study begins with an analysis of the national context, where challenges related to traffic congestion and the need to implement efficient, low-emission transportation alternatives persist.

Two structural prototypes were designed and evaluated. Prototype 1 allowed for the validation of the initial concept and the analysis of frame strength through finite element analysis (FEA) simulations, revealing limitations in stiffness, mass distribution, and modal behavior. These results guided the development of Prototype 2, redesigned with steel tubing, optimized geometry, and structural reinforcements in critical areas.

Simulations performed in HyperMesh showed significant improvements: increased natural frequency, reduced deformation, and greater resistance to combinations of static and dynamic loads (acceleration, braking, cornering, and impacts). The final design achieved a safety factor of 1.69, a torsional stiffness of  $1446 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ , and a flexural stiffness of  $13,684 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ , meeting the established structural criteria.

The study demonstrates the technical feasibility of an electric cargo bike adapted to the Ecuadorian urban environment and lays the groundwork for future physical validations under standards such as ISO 4210 and DIN 79010, aimed at ensuring the safety and durability of the design.

**Keywords:** Bicycle, Electric, Cargo, Structural, Rigidity, Mobility, FEA.

## Glosario

**AISI 4130:** Aleación de acero al cromo-molibdeno de alta resistencia mecánica y buena soldabilidad, comúnmente usada en estructuras tubulares ligeras.

**ASTM A36:** Tipo de acero al carbono estructural ampliamente utilizado por su buena resistencia, ductilidad y bajo costo.

**AutoCAD:** Software de diseño 2D y 3D utilizado para la elaboración de planos técnicos precisos de ingeniería y arquitectura.

**CAD (Computer-Aided Design):** Diseño asistido por computadora que permite crear, modificar y analizar modelos tridimensionales o bidimensionales de componentes mecánicos antes de su fabricación.

**CAE (Computer-Aided Engineering):** Ingeniería asistida por computadora empleada para realizar simulaciones estructurales, térmicas o dinámicas del diseño, garantizando su comportamiento seguro y eficiente.

**Carga útil:** Peso adicional (personas o mercancía) que puede soportar el vehículo sin comprometer su estabilidad o funcionamiento.

**Centro de gravedad:** Punto teórico donde se concentra el peso total de un cuerpo, determinante para la estabilidad estructural y el equilibrio del vehículo.

**Ciclo de carga:** Conjunto de condiciones o fuerzas a las que se somete una estructura durante su funcionamiento normal.

**DIN 79010:2020:** Norma alemana que define criterios de prueba y seguridad para bicicletas de carga, considerando resistencia, frenado y estabilidad.

**Ergonomía:** Ciencia que adapta el diseño de los productos a las características físicas del usuario, buscando comodidad y seguridad durante su uso.

**FEA (Finite Element Analysis):** Análisis por elementos finitos. Método numérico utilizado para calcular esfuerzos, deformaciones y vibraciones en estructuras complejas.

**Frecuencia natural:** Frecuencia a la cual una estructura vibra de manera libre; si coincide con una excitación externa, puede producirse resonancia.

**Fusion 360:** Programa CAD/CAM/CAE de Autodesk que integra modelado tridimensional, simulación estructural y manufactura digital.

**HyperMesh:** Software CAE de Altair Engineering usado para el preprocesamiento, mallado y análisis de modelos por elementos finitos.

**Long John:** Tipo de bicicleta de carga con el compartimento de transporte ubicado entre el manubrio y la rueda delantera, ofreciendo estabilidad y buena visibilidad.

**Mallado:** Proceso de dividir un modelo en pequeñas celdas (elementos finitos) para realizar análisis estructurales o dinámicos computacionales.

**Norma ISO 4210-2:2023:** Estándar internacional que establece los requisitos de seguridad estructural para bicicletas urbanas, de montaña y de carrera.

**Resonancia:** Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia natural, amplificando las vibraciones y comprometiendo la integridad estructural.

**Rigidez torsional:** Capacidad de una estructura para resistir la deformación angular cuando se aplica un momento torsor.

## Índice de contenidos

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen.....	iii
Palabras clave.....	iii
Abstract .....	iv
Keywords .....	iv
Glosario.....	v
Introducción .....	1
Problemática .....	1
Justificación .....	2
Marco Teórico.....	2
Fundamentos del Diseño Estructural .....	2
Tipos de bicicletas de carga .....	3
Estado del arte .....	5
Concepto de bicicletas de carga.....	5
Tendencias en diseño y tecnología .....	5
Impacto del comercio electrónico y la movilidad urbana.....	6
Integración de la asistencia eléctrica.....	6
Caso de estudio: Toyota y Douze Cycles (2023).....	6
Construcción y normas aplicables en bicicletas de carga .....	6
Objetivos .....	8
General .....	8
Específicos .....	8
Alcance .....	9
Materiales y Métodos.....	9
Materiales.....	9

Metodología .....	11
Resultados .....	11
1.    Prototipo 1: Diseño, construcción y análisis estructural.....	11
1.1 Selección de materiales.....	11
1.2 Sistema de dirección y suspensión.....	12
1.3 Análisis estructural y simulación .....	12
1.4 Evaluación de resultados.....	12
2.    Prototipo 2: Rediseño estructural y validación .....	13
2.1 Selección de materiales optimizados .....	13
2.2 Rediseño geométrico.....	14
2.3 Análisis modal .....	16
2.4 Cálculo de carga máxima de la bicicleta.....	18
2.5 Cálculo de rigidez torsional .....	18
2.6 Cálculo de rigidez flexionante .....	19
2.7 Cálculo de .....	20
2.8 Evaluación de combinaciones de carga: .....	20
2.9 Evaluación de resultados.....	22
3.    Comparación entre Prototipo 1 y Prototipo 2 .....	22
3.1 Diferencias en materiales y geometría .....	22
3.2    Comparación de resultados estructurales.....	22
3.3    Análisis de mejora y desempeño final .....	22
Conclusiones y Recomendaciones .....	23
Referencias bibliográficas.....	24
Anexos .....	26

## Índice de tablas

Tabla 1. Materiales utilizados.....	9
Tabla 2. Propiedades mecánicas y físicas acero ASTM-A36.....	10
Tabla 3. Definición de los apoyos.....	15
Tabla 4. Criterios de calidad de la malla.....	15
Tabla 5. Resumen del cálculo de la rigidez torsional del cuadro.....	19
Tabla 6. Resumen del cálculo de la rigidez flexionante del cuadro.....	19
Tabla 7. Combinaciones de carga y factores de seguridad del cuadro. ....	21

## Índice de figuras

Figura 1. Tipos de bicicletas de carga.....	5
Figura 2. Resultado de la frecuencia natural del prototipo 1. ....	13
Figura 3. Diseño final del prototipo 2 del cuadro con las cotas generales de la estructura. ....	13
Figura 4. Calidad de malla y porcentaje de error.....	14
Figura 5. Detalle del mallado aplicado en la estructura del cuadro. ....	16
Figura 6. Resultado de la frecuencia natural del prototipo 2. ....	16
Figura 7. Resultado del modo de vibración del prototipo 2.....	17
Figura 8. Ubicación del esfuerzo máximo de Von Mises para la combinación 1. ....	22

## Índice de anexos

Anexo 1. Resultado del modo de vibración del prototipo 1. ....	26
Anexo 2. Deformación máxima en el eje Y bajo la aplicación de cargas vivas y cargas muertas en el cuadro del prototipo 2.....	27

Anexo 3. Aplicación de las fuerzas en el cuadro del prototipo 2 para el cálculo de la rigidez torsional.....	28
Anexo 4. Deformación máxima en el eje Y obtenida para el cálculo de la rigidez torsional del prototipo 2.....	29
Anexo 5. Aplicación de la fuerza para el cálculo de la rigidez flexionante del cuadro del prototipo 2.....	30
Anexo 6. Deformación máxima en el eje Y correspondiente al cálculo de la rigidez flexionante del prototipo 2.....	31
Anexo 7. Aplicación de las cargas de las combinaciones en el cuadro – Prototipo 2.....	32
Anexo 8. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 1 – Prototipo 2.....	33
Anexo 9. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 2 – Prototipo 2.....	34
Anexo 10. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 3 – Prototipo 2.....	35
Anexo 11. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 4 – Prototipo 2.....	36
Anexo 12. Estructura de la malla del cuadro de la bicicleta, con separación de espesores y configuración PSHELL – Prototipo 2.....	37
Anexo 13. Primera mejora aplicada al diseño estructural del cuadro – Prototipo 2.....	38
Anexo 14. Segunda mejora aplicada al diseño estructural del cuadro – Prototipo 2.....	39
Anexo 15. Vista general del conjunto (Prototipo 2). .....	40
Anexo 16. Vista frontal de la bicicleta (Prototipo 2). .....	41
Anexo 17. Vista de los componentes del sistema (Prototipo 2). .....	42
Anexo 18. Zona destinada al equipamiento eléctrico (Prototipo 2).....	43

Anexo 19. Dimensiones de la ciclovía.....	44
Anexo 20. Renderizado de la e_cargo_bike en la ciclovía. ....	45
Anexo 21. Estructura del chasis de la e_cargo_bike del prototipo 1.....	45
Anexo 22. Vista lateral de la e_cargo_bike del prototipo 1.....	46
Anexo 23. Sistema de soporte para mantener estable la bicicleta del prototipo 1.....	46
Anexo 24. Cuadro de acero correspondiente al prototipo 1 de la bicicleta de carga. ....	47
Anexo 25. Sistema de dirección del prototipo 1.....	47
Anexo 26. Vista posterior del sistema de dirección prototipo 1.....	48
Anexo 27. Llanta delantera con la junta de conexión del prototipo 1. ....	48
Anexo 28. Vista lateral del prototipo 1 con el Dummy. ....	49
Anexo 29. Vista frontal de la bicicleta de carga del prototipo 1.....	49
Anexo 30. Vista posterior de la bicicleta de carga del prototipo 1.....	50
Anexo 31. Bicicleta de carga del prototipo 1 sin elementos en la zona de carga. ....	50
Anexo 32. Bicicleta de carga del prototipo 1 con un contenedor especial ajustado a su estructura.....	51
Anexo 33. Bicicleta de carga del prototipo 1 transportando un bloque motor. ....	51
Anexo 34. Bicicleta de carga del prototipo 1 con un contenedor comercial estándar. ....	52
Anexo 35. Bicicleta de carga del prototipo 1 transportando una caja asegurada con cintas de sujeción. ....	52
Anexo 36. Vista en plano del conjunto estructural y componentes del prototipo 1. ....	53
Anexo 37. Esquema de cotas principales y geometría global del prototipo 1. ....	53
Anexo 38. Archivos de trazado y diagramas de corte CNC utilizados en la manufactura del prototipo 1.....	54

Anexo 39. Modelo del cuadro de la bicicleta del prototipo 1 en el software HyperMesh.....	54
Anexo 40. Puntos fijos aplicados al cuadro de la bicicleta del prototipo 1. ....	55
Anexo 41. Zona de aplicación de la carga correspondiente al peso del usuario en el prototipo 1.....	55
Anexo 42. Logotipo propuesto para la e_cargo_bike. ....	56

## **Introducción**

Las bicicletas eléctricas de carga representan una alternativa eficiente y sostenible para la movilidad urbana y la distribución de mercancías, al combinar la eficiencia energética de la bicicleta tradicional con la capacidad de transportar cargas pesadas o voluminosas. Su implementación contribuye a reducir la congestión vehicular y las emisiones contaminantes, favoreciendo la transición hacia sistemas de transporte más sostenibles (Marincek Réat & Lurkin, 2024).

En Europa, su crecimiento ha sido notable: en Suiza, las ventas aumentaron un 184% entre 2019 y 2021, reflejando un cambio hacia modelos de movilidad más sostenibles (Velosuisse, 2023). En contraste, en América Latina, y especialmente en Ecuador, su adopción aún es limitada, aunque ciudades intermedias como Cuenca presentan condiciones propicias —distancias cortas, topografía moderada y políticas municipales orientadas a la movilidad sostenible— para su desarrollo (Municipio de Cuenca, 2015).

Desde el punto de vista técnico, la aplicación de estándares internacionales, como la ISO 4210-2:2023, permite garantizar la seguridad, durabilidad y desempeño mecánico de estos vehículos (International Organization for Standardization, 2023).

## **Problemática**

La movilidad sostenible es una prioridad en Ecuador, impulsada por la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible (PNMUS), que busca reducir la dependencia de combustibles fósiles y fomentar el uso de medios de transporte no motorizados (Ortega, 2019). Sin embargo, uno de los principales desafíos técnicos es el diseño estructural de las bicicletas de carga, las cuales deben soportar mayores esfuerzos sin comprometer la seguridad, estabilidad ni maniobrabilidad, especialmente en entornos urbanos con pendientes o infraestructura irregular.

En este contexto, el desarrollo de diseños estructurales adecuados adaptados a las condiciones locales constituye una necesidad. El presente estudio busca aportar soluciones basadas en normativa internacional (como la ISO 4210-2:2023) y adaptadas al entorno urbano de Cuenca, contribuyendo a una movilidad más eficiente, segura y sostenible (International Organization for Standardization (ISO), 2023).

## Justificación

La creciente preocupación por el cambio climático y la contaminación urbana ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en el transporte. Las bicicletas eléctricas de carga emergen como una solución eficaz para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire urbano.

Estudios internacionales demuestran su potencial: la iniciativa Cyclelogistics (2014) evidenció que hasta el 51% de los desplazamientos logísticos urbanos podrían realizarse mediante bicicletas de carga. El ITDP estimó que su adopción masiva podría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte urbano en hasta un 11% para 2050 (Yanocha & Allan, 2019), mientras que otros análisis sugieren que más de la mitad de las entregas urbanas actualmente realizadas con furgonetas podrían sustituirse por este medio (Schrader et al., 2024).

Experiencias exitosas, como el proyecto piloto de Logroño (España), financiado por la Unión Europea, evidencian su viabilidad para la distribución urbana sostenible (SE12, 2025).

En el contexto ecuatoriano, donde las ciudades enfrentan desafíos de congestión vehicular y contaminación, el diseño de bicicletas de carga eléctricas representa una estrategia prometedora. Este proyecto busca demostrar su viabilidad técnica y ambiental en ciudades intermedias como Cuenca, contribuyendo a una movilidad más sostenible, eficiente e inclusiva.

## Marco Teórico

### Fundamentos del Diseño Estructural

El diseño estructural de una bicicleta de carga eléctrica requiere una comprensión integral de los aspectos técnicos y mecánicos involucrados. Entre los principales fundamentos se incluyen la resistencia del cuadro, la selección de materiales, la capacidad de carga y el cumplimiento de normativas internacionales (Gordillo & Riaño, 2024).

Gordillo & Riaño (2024) destacan que el diseño de bicicletas eléctricas debe garantizar la estabilidad estructural y la eficiencia del sistema de asistencia eléctrica, mientras que Herrera (2022) enfatiza la importancia de una adecuada selección de componentes mecánicos y eléctricos para optimizar el rendimiento del vehículo.

Para el modelado estructural del cuadro se emplean herramientas de diseño asistido por computadora, específicamente el software CAD Fusion 360®, lo que permite definir con

precisión la geometría, los detalles constructivos y las condiciones de carga consideradas en el análisis.

Asimismo, la elección de materiales influye directamente en la durabilidad y resistencia del diseño. Torres Brito et al., (2018) propuso un modelo estructural para bicicletas eléctricas basado en el análisis comparativo de materiales disponibles localmente, resaltando la necesidad de seleccionar aquellos que equilibren peso, costo y resistencia.

A nivel normativo, la ISO 4210-2:2023 establece los requisitos estructurales y de seguridad aplicables a bicicletas urbanas y de trekking, incluyendo aspectos como resistencia del marco, ensayos de fatiga, y pruebas de frenos y dirección (International Organization for Standardization (ISO), 2023). Aunque esta norma no contempla específicamente a las bicicletas de carga, sus parámetros pueden adaptarse como referencia para el diseño seguro de este tipo de vehículos.

Por su parte, la norma japonesa JIS D 9201:2001 define los métodos de ensayo de frenado, asegurando la eficacia de los sistemas de frenos bajo diferentes condiciones operativas (Japanese Industrial Standard, 2001). Su aplicación resulta particularmente relevante en bicicletas de carga eléctricas, donde el aumento del peso y la distribución de carga afectan directamente el rendimiento del frenado.

En conjunto, la integración de criterios normativos internacionales, la selección adecuada de materiales y el uso de herramientas CAD-CAE constituyen la base para desarrollar una bicicleta de carga eléctrica estructuralmente segura, eficiente y duradera.

### **Tipos de bicicletas de carga**

Las bicicletas de carga, conocidas internacionalmente como cargo bikes, han adquirido una creciente relevancia dentro de la movilidad urbana sostenible. Estos vehículos permiten el transporte de mercancías, herramientas o incluso pasajeros, reduciendo la dependencia del automóvil y las emisiones contaminantes Álvarez (2025), existen diversos tipos de bicicletas de carga, cada una adaptada a necesidades específicas de uso, capacidad y diseño estructural, como se ilustra en la Figura 1.

**a) Bicicleta de carga para paquetería**

Diseñadas principalmente para la distribución de paquetes y mercancías ligeras en zonas urbanas. Su estructura prioriza la estabilidad y la capacidad de carga, incorporando plataformas delanteras o traseras para contenedores. Son ampliamente utilizadas por empresas de mensajería y reparto de última milla, debido a su eficiencia en entornos con calles estrechas.

**b) Bicicleta de carga tipo “utility”**

Estas bicicletas se destacan por su versatilidad, combinando el uso personal y laboral. Disponen de bastidores reforzados, portaequipajes integrados y espacio para transportar cargas moderadas o pasajeros. Su uso es común en desplazamientos urbanos, compras o tareas profesionales ligeras.

**c) Bicicleta de carga tipo “long tail”**

Poseen una extensión en la parte trasera del cuadro, donde se pueden colocar asientos, alforjas o soportes adicionales. Son muy populares entre familias, por su estabilidad y capacidad de carga, y muchos modelos incluyen asistencia eléctrica para facilitar su uso en pendientes.

**d) Bicicleta de carga tipo “cycle truck”**

Cuentan con una plataforma de carga situada sobre la rueda delantera o frente al cuadro, lo que les otorga un diseño compacto y maniobrable. Son ideales para repartos urbanos ligeros o medianos, destacando por su facilidad de manejo en tráfico denso.

**e) Bicicleta de carga tipo “long john”**

Se caracterizan por su estructura alargada y el compartimento de carga ubicado entre el manubrio y la rueda delantera, manteniendo un centro de gravedad bajo y una visibilidad directa de la carga, lo que mejora la seguridad y control del conductor. Son óptimas para el transporte de mercancías grandes o voluminosas.



a) Bicicleta de carga para paquetería.



b) Bicicleta de carga tipo “Utility”.



c) Bicicleta de carga tipo “Long Tail”.



d) Bicicleta de carga tipo “Cycle Truck”.



e) Bicicleta de carga tipo “Long John”.

**Figura 1. Tipos de bicicletas de carga.**

Fuente: (Álvarez, 2025).

## Estado del arte

La información sobre el diseño estructural de bicicletas eléctricas de carga es limitada, ya que las grandes corporaciones manejan sus desarrollos y simulaciones CAE de forma privada, con el fin de proteger sus innovaciones y ventajas competitivas.

## Concepto de bicicletas de carga

Las bicicletas de carga son una alternativa sostenible para el transporte urbano, por su capacidad de trasladar mercancías de manera eficiente (Bello, 2019). Entre los modelos más comunes se destacan las “long john” y “long tail”, reconocidas por su estabilidad y maniobrabilidad. Las tendencias actuales buscan diseños más compactos y ligeros, adecuados para entornos urbanos densos (Paudel & Yap, 2024). Su adopción ha crecido en Europa y América Latina, impulsada por políticas de movilidad sostenible y la necesidad de reducir la congestión y las emisiones contaminantes.

## Tendencias en diseño y tecnología

El diseño estructural es un factor determinante para la seguridad y durabilidad de las e-cargo bikes. Se emplean programas de análisis por elementos finitos (FEA) como HyperMesh y ANSYS para evaluar el comportamiento del cuadro ante distintas cargas (Ramírez & Sarango, 2024). Además, se ha optimizado la ergonomía y distribución de cargas, mejorando la maniobrabilidad y confort del usuario.

## **Impacto del comercio electrónico y la movilidad urbana**

El auge del comercio electrónico ha incrementado el uso de estas bicicletas en logística de última milla (Paudel & Yap, 2024). Gracias a la asistencia eléctrica, ofrecen mayor autonomía y eficiencia en terrenos inclinados o recorridos extensos (Ramírez & Sarango, 2024). Empresas como DHL, Amazon y Glovo las han incorporado en sus operaciones urbanas, evidenciando su aporte a una movilidad sostenible y descongestionada.

## **Integración de la asistencia eléctrica**

Los sistemas de asistencia eléctrica, basados en motores hub o mid-drive y baterías de ion-litio, permiten autonomías superiores a 60 km por carga (Ramírez & Sarango, 2024). Esta tecnología amplía la capacidad de transporte y el rango de usuarios, promoviendo un uso seguro y accesible.

## **Caso de estudio: Toyota y Douze Cycles (2023)**

En 2023, Toyota Francia, en alianza con Douze Cycles, lanzó un modelo de bicicleta eléctrica de carga con estructura modular de aluminio, capacidad de 100 kg y autonomía de 100 km (douze cycles, 2025). Este proyecto forma parte de su estrategia de movilidad sostenible, incorporando la venta de bicicletas en más de 170 concesionarios.

La iniciativa demuestra cómo la colaboración entre fabricantes automotrices y de bicicletas puede generar soluciones sostenibles y escalables, sirviendo como referencia para el desarrollo de proyectos similares en América Latina, especialmente en el contexto urbano ecuatoriano (Reid, 2023).

## **Construcción y normas aplicables en bicicletas de carga**

La construcción de las bicicletas de carga presenta características técnicas específicas que las distinguen de las bicicletas convencionales, debido a sus mayores exigencias de carga, estabilidad y durabilidad. Los fabricantes especializados, como Regen Cargo Bikes, desarrollan estructuras reforzadas que optimizan la relación entre peso, rigidez y capacidad de transporte, garantizando la seguridad del usuario y el cumplimiento de normas internacionales de calidad y seguridad (Regen Tech, 2025).

Asimismo, para las bicicletas de carga tipo “*long john*” se considera la norma alemana DIN 79010:2020-02, que establece un plan de ensayos prácticos de frenado, resistencia estructural, estabilidad y seguridad específicos para este tipo de vehículos, sirviendo como

referencia técnica para el diseño y validación del cuadro y del sistema de frenos (Deutsches Institut für Normung (DIN), 2020).

## **Componentes estructurales y criterios de construcción:**

### **1. Materiales del marco y geometría**

Las bicicletas de carga emplean materiales de alta resistencia, como acero al cromo-molibdeno o aluminio de grado aeronáutico, que proporcionan rigidez y bajo peso. El cuadro se refuerza mediante tubos de mayor sección y soldaduras precisas, especialmente en la zona del compartimiento de carga y la dirección.

### **2. Suspensión, ruedas y neumáticos**

Las ruedas utilizan aros de doble pared, 36 a 48 radios y bujes reforzados. Los neumáticos anchos y antipinchazos permiten soportar cargas superiores a 100 kg, ofreciendo mayor estabilidad y seguridad.

### **3. Frenos y sistemas de parada**

Predominan los frenos de disco hidráulicos en ambos ejes, complementados con sistemas de estacionamiento para operaciones de carga. En los modelos eléctricos, los frenos se integran con el sistema de asistencia para interrumpir la potencia del motor al frenar.

### **4. Componentes eléctricos**

Los motores eléctricos de 250 W combinados con baterías de ion-litio proporcionan autonomías de hasta 100 km por carga, cumpliendo con normativas europeas de seguridad eléctrica que aseguran eficiencia y estabilidad térmica.

### **5. Caja o compartimiento de carga**

Se fabrican con aluminio o madera laminada, priorizando un centro de gravedad bajo y distribución equilibrada del peso. En versiones familiares se incluyen asientos, cinturones de seguridad y cubiertas protectoras.

### **6. Ensayos de durabilidad y resistencia**

Estos vehículos se someten a ensayos de fatiga, vibración e impacto, verificando la resistencia estructural del marco y componentes bajo condiciones reales de uso.

## **Normas y estándares aplicables:**

La fabricación y certificación de bicicletas de carga se rige por normativas internacionales que garantizan seguridad, desempeño y calidad:

1. **EN 17860:** Norma europea específica para bicicletas de carga; define requisitos mecánicos, eléctricos y funcionales para distintas configuraciones.
2. **DIN 79010:2020:** Norma alemana que establece métodos de prueba y criterios de seguridad estructural, frenado y estabilidad.
3. **ISO 4210:** Norma internacional de seguridad general para bicicletas, utilizada como referencia en ensayos estructurales.
4. **EN 15194:** Regula las bicicletas eléctricas con asistencia al pedaleo, controlando aspectos eléctricos, de potencia y seguridad de baterías y motores.

El cumplimiento de estas normas asegura que modelos comerciales, como la Regen “long john” Cargo Bike – Regen 02, alcancen altos niveles de confiabilidad, estabilidad y desempeño, favoreciendo su adopción en mercados internacionales y urbanos (Regen Tech, 2025).

## **Objetivos**

### **General:**

Diseñar una Bicicleta de Carga Eléctrica (e\_cargo\_bike) para Movilidad Urbana en el Ecuador, capaz de transportar al menos 30 kg, mediante el análisis estructural y pruebas físicas para garantizar su resistencia y funcionalidad.

### **Específicos:**

1. Definir el modelo base de la bicicleta de carga, considerando criterios de ergonomía, funcionalidad y comodidad, mediante el análisis comparativo de distintas configuraciones existentes y la selección de materiales adecuados para su construcción, en función de sus propiedades y disponibilidad local.
2. Diseñar un modelo tridimensional a escala real de la bicicleta, utilizando software CAD (Computer-Aided Design), considerando los requisitos funcionales, estructurales y ergonómicos establecidos en la fase previa.

3. Simular el comportamiento estructural del diseño mediante análisis por elementos finitos, utilizando software FEA (Finite Element Analysis), con el objetivo de validar la resistencia mecánica de la bicicleta.

## Alcance

El presente proyecto de graduación se desarrollará en Cuenca, Ecuador, con el propósito de diseñar una bicicleta de carga eléctrica capaz de transportar al menos 30 kg de manera segura y eficiente, en concordancia con las políticas locales de movilidad sostenible y reducción de emisiones contaminantes.

El proyecto comprende el diseño estructural y modelado digital de la bicicleta, evaluando su resistencia y capacidad de carga mediante herramientas de simulación. Asimismo, se realizará la selección de materiales adecuados y el análisis de viabilidad técnica, bajo la supervisión de un tutor académico que acompañará el proceso de validación del diseño.

## Materiales y Métodos

### Materiales

Para la construcción de los prototipos de la bicicleta eléctrica de carga, se seleccionó acero como material principal, debido a su alta resistencia mecánica, rigidez estructural y durabilidad, lo que garantiza seguridad y estabilidad durante las pruebas iniciales.

El modelado en CAD y el análisis por elementos finitos (FEA) permitieron evaluar y comparar el comportamiento estructural de los prototipos, optimizando así el proceso de diseño. La construcción del primer prototipo, realizada con apoyo de compañeros, sirvió como referencia empírica para mejorar el diseño del segundo modelo. Los materiales utilizados en el análisis y modelado se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Materiales utilizados.**

Material	Especificaciones
Computadora	SUS TUF Gaming F15
Especificaciones de hardware	<p><b>Sistema operativo:</b> Windows 11 (64-bit).</p> <p><b>Tarjeta RAM:</b> 16 GB.</p> <p><b>Espacio en disco duro:</b> 476 GB.</p> <p><b>Tarjeta gráfica:</b> NVIDIA GeForce GTX 1650 (4 GB)</p> <p><b>Procesador:</b> Intel Core i7.</p>



<b>Equipo electrónico</b>	<p><b>Voltaje:</b> 72V.  <b>Capacidad de batería:</b> 40 Ah.  <b>Potencia:</b> 2.8 kW.  <b>Velocidad máxima:</b> 70 Km/h.  <b>Peso de batería:</b> 15 Kg.  <b>Torque máximo:</b> 205 N·m.</p>	
<b>Programas CAD y CAE</b>	<p><b>Autodesk® AutoCAD®:</b> Software CAD de diseño y documentación 2D y 3D.  <b>Versión utilizada:</b> AutoCAD® 2026 (Autodesk, 2026).</p>	
	<p><b>Autodesk® Fusion 360™:</b> Software CAD/CAM/CAE integrado para modelado 3D, simulación y diseño mecánico.  <b>Versión utilizada:</b> Fusion 360® 2025 (2604.1.48) (Autodesk, 2025).</p>	
	<p><b>Altair® HyperMesh®:</b> Software de análisis de elementos finitos (FEA) para preprocesamiento y mallado avanzado.  <b>Versión utilizada:</b> HyperMesh® 2022.3 (Altair Engineering, 2022).</p>	

### Tubería de Acero ASTM A36:

El ASTM-A36 es clasificado como un acero al carbono estructural. Sus propiedades como se puede observar en la tabla 2, lo hacen ideal para la construcción y diversas aplicaciones industriales por su combinación de resistencia, soldabilidad y costo-efectividad (Cía. General de Aceros, 2024).

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas y físicas acero ASTM-A36.

<b>Acero ASTM-A36</b>		
<b>Propiedades mecánicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Límite de Fluencia (Fy)	250	MPa
Módulo de Elasticidad (E)	200	GPa
Resistencia Última a la Tracción (Sut)	400	MPa
Coeficiente de Poisson (v)	0.30	-
<b>Propiedad física</b>		
Densidad ( $\rho$ )	7850	$Kg/m^3$

**Fuente:** (Cía. General de Aceros, 2024).

## Metodología

El proyecto se desarrolló mediante un proceso sistemático que abarcó desde la investigación inicial hasta la validación estructural del diseño.

- 1. Revisión bibliográfica:** Se analizaron normas técnicas, criterios ergonómicos y principios de diseño estructural aplicados a bicicletas de carga, definiendo parámetros de seguridad, confort y funcionalidad.
- 2. Selección de materiales:** Se evaluaron las opciones disponibles y se eligió acero por su resistencia, rigidez y facilidad de manufactura.
- 3. Diseño tridimensional:** Se modeló la bicicleta en Fusion 360, integrando el cuadro, los componentes eléctricos y un modelo humano para validar la ergonomía y distribución de cargas.
- 4. Planos técnicos:** Se elaboraron en AutoCAD planos a escala real para la fabricación y ensamblaje de las piezas.
- 5. Construcción del prototipo:** Se fabricó un primer modelo en acero para evaluar la resistencia y funcionalidad del diseño, realizando los ajustes necesarios para su optimización.
- 6. Simulación estructural:** Se efectuaron análisis por elementos finitos (FEA) en HyperMesh, verificando los esfuerzos y deformaciones del cuadro para asegurar el cumplimiento de los criterios de seguridad estructural.

## Resultados

### 1. Prototipo 1: Diseño, construcción y análisis estructural

El primer prototipo de la bicicleta de carga eléctrica tipo “*long john*” se desarrolló para validar el concepto estructural y funcional del diseño inicial. Se emplearon materiales metálicos de fácil adquisición y componentes impresos en 3D, con el fin de evaluar la resistencia de uniones, el sistema de dirección y la ergonomía general del conjunto.

**1.1 Selección de materiales:** Se utilizaron planchas de acero al carbono de 2 mm y 4 mm y tubos estructurales cuadrados de 1 pulgada × 2 mm, elegidos por su disponibilidad local, resistencia mecánica y facilidad de soldadura (DIPAC, 2020). Este material proporcionó la rigidez necesaria para las pruebas iniciales, aunque incrementó el peso total del prototipo.

**1.2 Sistema de dirección y suspensión:** El sistema de dirección se diseñó con base en el modelo CAD conceptual, utilizando una barra sólida de  $\frac{1}{2}$  pulgada y una pieza impresa en 3D con PETG reforzado con fibra de carbono, lo que mejoró la precisión y redujo el peso. Asimismo, se integró una suspensión telescópica delantera adaptada de una bicicleta de montaña, reforzada con una base de acero soldada. Este sistema mejoró la estabilidad y la absorción de impactos, aunque aumentó el peso y desplazó el centro de gravedad hacia el frente.

**1.3 Análisis estructural y simulación:** El modelo se analizó mediante Elementos Finitos (FEA) en Altair HyperMesh, aplicando elementos sólidos y de cascarón con condiciones de frontera que simularon el peso del ciclista, una carga útil de 30 kg y el apoyo de las ruedas.

El análisis no se centró en la probabilidad de resonancia, sino en comprender la rigidez global del cuadro y en identificar los modos menos rígidos de la estructura. Las frecuencias naturales obtenidas presentadas en la figura 2 permitieron visualizar las zonas con menor rigidez dinámica, evidenciando deformaciones principalmente en la parte frontal y en el bastidor principal. A partir de esta información es posible proponer refuerzos estructurales de forma más precisa.

Asimismo, el análisis modal mostrado en el anexo 1 determinó que los modos 1 y 2 correspondían a flexión, el modo 3 a torsión primaria, el modo 4 a torsión secundaria, y los modos 5 y 6 combinaban flexión y torsión, reflejando un comportamiento mixto del cuadro.

**1.4 Evaluación de resultados:** El análisis confirmó el correcto funcionamiento del sistema de dirección y suspensión, aunque el exceso de peso y la distribución de masas redujeron la rigidez estructural y la frecuencia natural del cuadro. Se concluyó que el diseño debía optimizarse mediante el uso de materiales más óptimos y de mejor desempeño mecánico, junto con una geometría estructural mejor distribuida, estableciendo las bases para el Prototipo 2, orientado a una mayor eficiencia estructural y ergonómica.

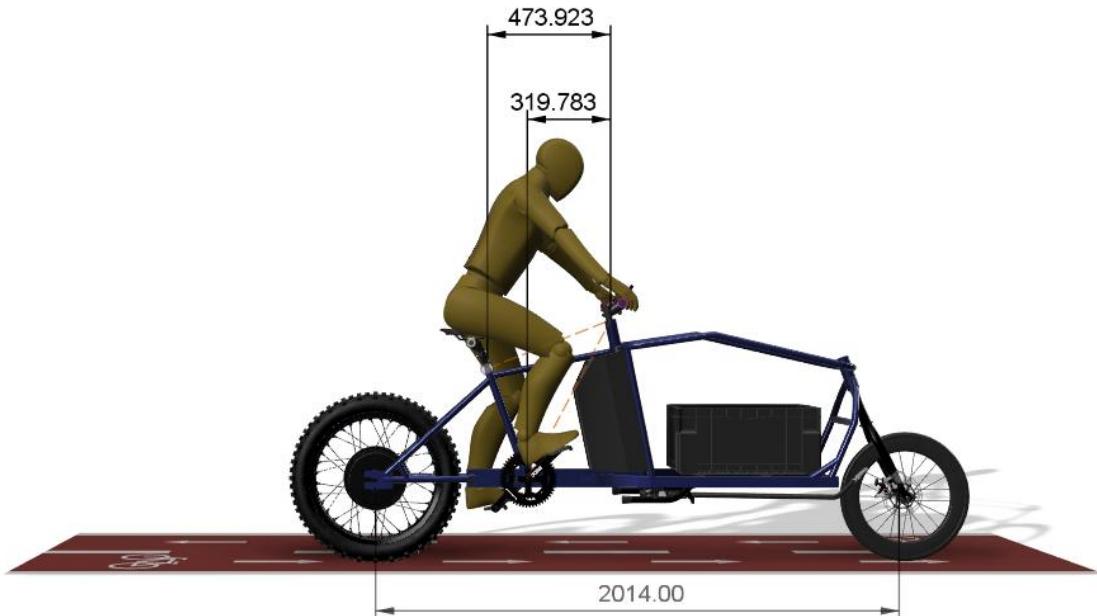
MODO	FRECUENCIA NATURAL (Hz)
1	26.27
2	31.23
3	34.9
4	71.37
5	97.84
6	103.58

**Figura 2.** Resultado de la frecuencia natural del prototipo 1.

## 2. Prototipo 2: Rediseño estructural y validación

El Prototipo 2 de la bicicleta de carga eléctrica tipo *longjohn* se desarrolló para corregir las limitaciones estructurales detectadas en el primer diseño, mejorando su rigidez, estabilidad y comportamiento dinámico.

**2.1 Selección de materiales optimizados:** Se sustituyeron los materiales del prototipo anterior por tubos de acero al cromo-molibdeno (AISI 4130), los cuales presentan mejor relación resistencia-peso y mayor durabilidad que el acero al carbono (DIPAC, 2020). Este cambio permitió reducir masa y aumentar la resistencia estructural. El diseño final del cuadro, junto con las cotas principales definidas para garantizar su correcta configuración geométrica y ergonómica, se presenta en la Figura 3.

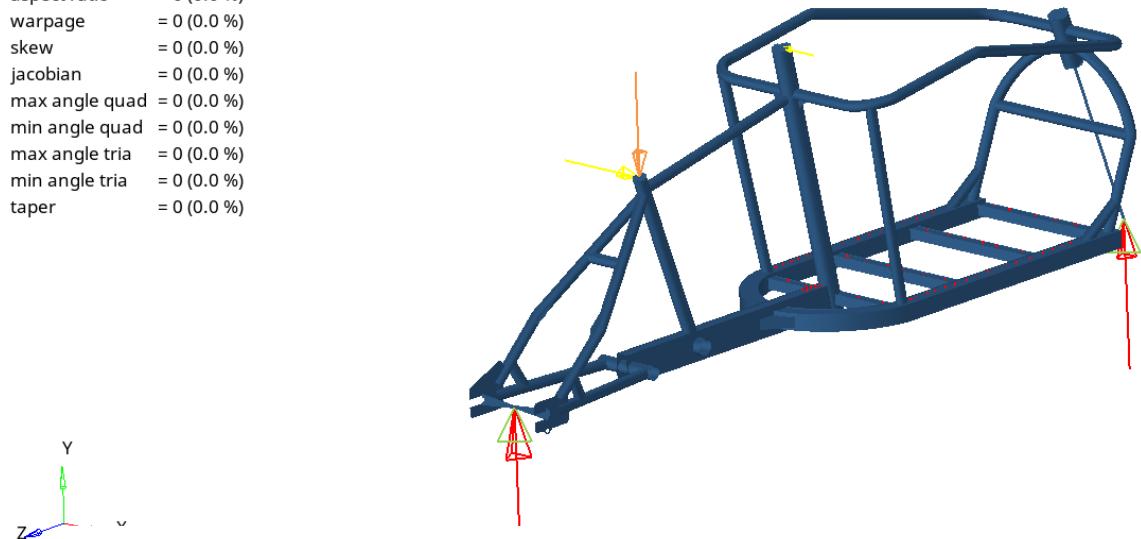


**Figura 3.** Diseño final del prototipo 2 del cuadro con las cotas generales de la estructura.

**2.2 Rediseño geométrico:** El cuadro fue rediseñado en Fusion 360 empleando una geometría optimizada a partir del uso de tubos circulares, rectangulares y cuadrados, lo que permitió mejorar la rigidez general de la estructura. Adicionalmente, se reforzaron las zonas donde el análisis mostró los mayores valores de esfuerzo de von Mises, incrementando la capacidad del cuadro para soportar cargas extremas y reduciendo el riesgo de falla en esas áreas críticas. La calidad de la malla se puede observar en la Figura 4. Con la herramienta “*qualityindex*” se evaluó el porcentaje de error en los elementos y se identificaron las zonas con desperfectos críticos. Luego, mediante “*elem cleanup*” se optimizó la malla hasta obtener un error del 0,0%.

Elements Violating Thresholds:

min size	= 0 (0.0 %)
max size	= 0 (0.0 %)
aspect ratio	= 0 (0.0 %)
warpage	= 0 (0.0 %)
skew	= 0 (0.0 %)
jacobian	= 0 (0.0 %)
max angle quad	= 0 (0.0 %)
min angle quad	= 0 (0.0 %)
max angle tria	= 0 (0.0 %)
min angle tria	= 0 (0.0 %)
taper	= 0 (0.0 %)



**Figura 4.** Calidad de malla y porcentaje de error.

En la Tabla 3 se resumen las condiciones de apoyo consideradas en el modelo numérico. Se definieron dos apoyos: uno en la llanta trasera y otro en la llanta delantera. En ambos casos se restringieron los desplazamientos en las direcciones X y Y, representando el anclaje del conjunto rueda-suelo en el plano horizontal. Adicionalmente, en la llanta delantera se fijó también el desplazamiento en Z, mientras que los grados de libertad en rotación RX se mantuvieron libres en ambos apoyos, permitiendo la transmisión realista de esfuerzos sin sobrerrestricción del modelo.

**Tabla 3.** Definición de los apoyos.

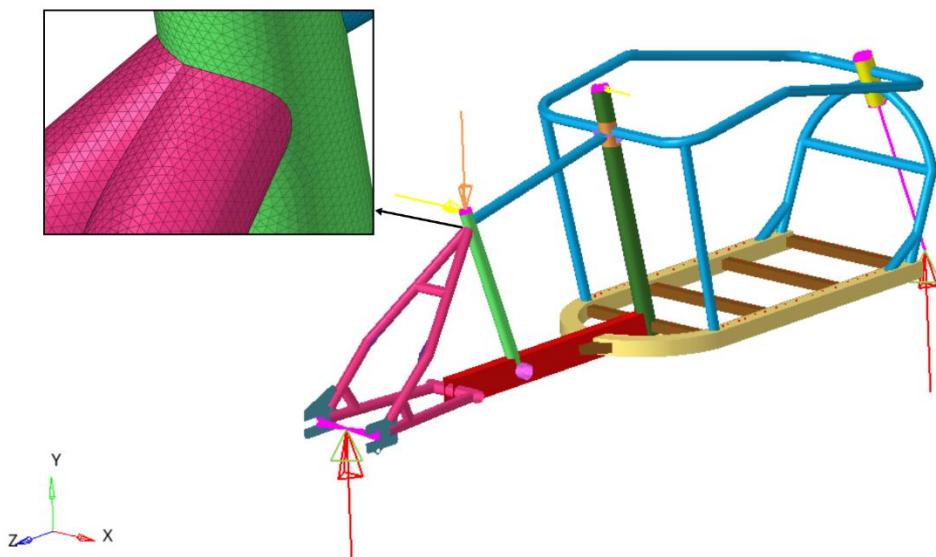
Tipo	Etiqueta	X	Y	Z	RX
Apoyo	Llanta trasera	Fijo	Fijo	Libre	Libre
Apoyo	Llanta delantera	Fijo	Fijo	Fijo	Libre

En la Tabla 4 se resumen los criterios de calidad empleados para evaluar la malla del modelo. Estos parámetros permiten verificar que los elementos presenten una geometría adecuada para obtener resultados confiables en el análisis estructural. Se consideraron límites como un aspect ratio máximo de 5.0, warpage de  $15^\circ$ , skew de  $40^\circ$  y un Jacobian mínimo de 0.60, además de los ángulos permitidos para elementos cuadriláteros y triangulares. El criterio taper, con un máximo de 0.60, complementa esta evaluación al controlar la deformación geométrica de los elementos. En conjunto, estos valores aseguran que la malla cumpla con estándares mínimos de calidad numérica para un desempeño óptimo en la simulación.

**Tabla 4.** Criterios de calidad de la malla.

Criterio	Fail Value
aspect ratio	5.0
warpage	15.0
skew	40.0
jacobian	0.60
max angle quad	140.0
min angle quad	40.0
max angle tria	120.0
min angle tria	30.0
taper	0.60

En la Figura 5 se observa un detalle específico del mallado aplicado en la estructura del cuadro, donde se aprecia la discretización fina empleada en la zona de unión entre los tubos. Este acercamiento permite identificar la correcta continuidad entre elementos, fundamental para garantizar la calidad del modelo durante el análisis estructural.

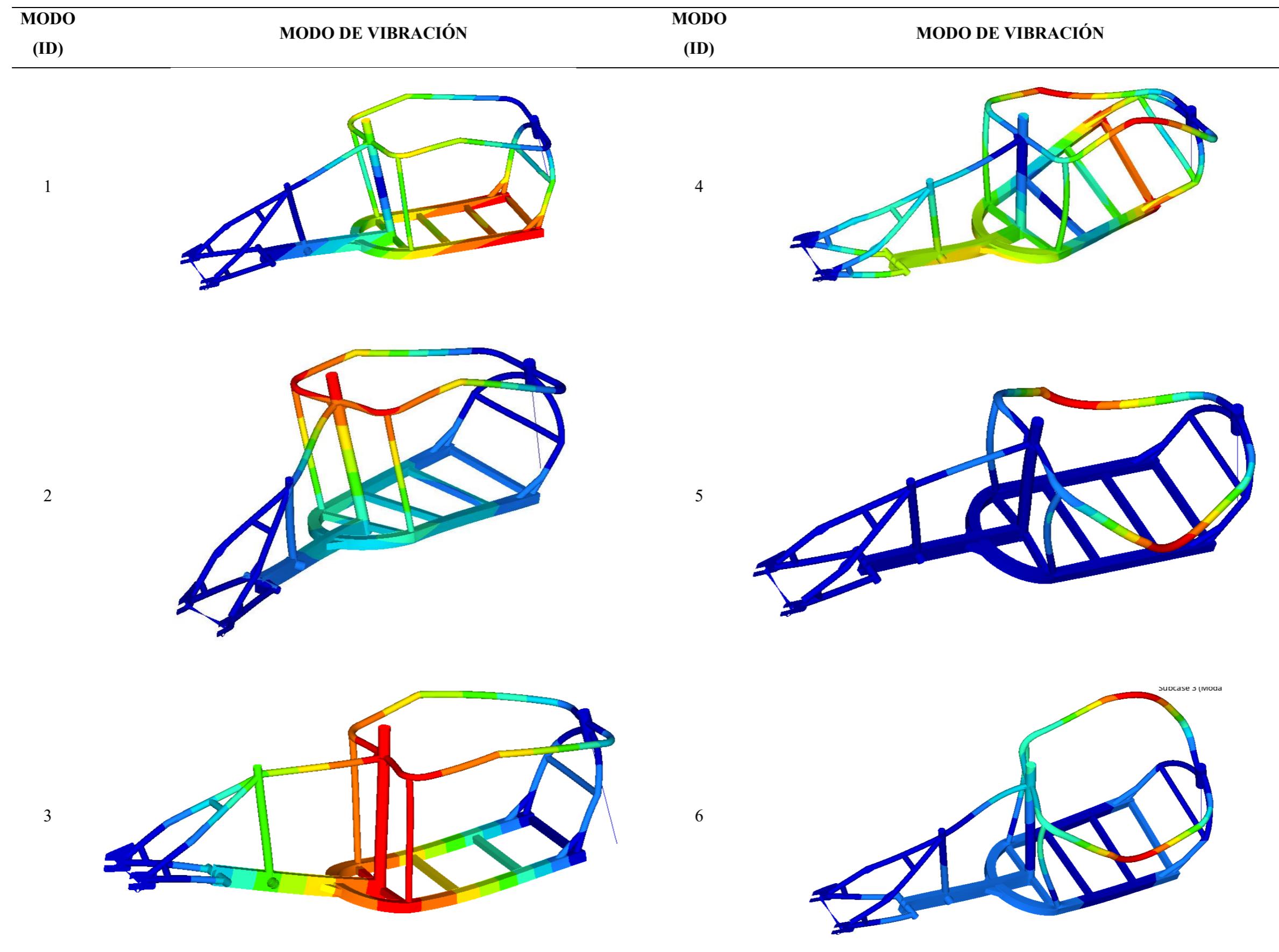


**Figura 5.** Detalle del mallado aplicado en la estructura del cuadro.

**2.3 Análisis modal:** El modelo se evaluó mediante análisis por elementos finitos (FEA) en Altair HyperMesh, aplicando las mismas condiciones de frontera que el Prototipo 1. Los resultados mostraron un incremento en la rigidez dinámica y una frecuencia natural superior, eliminando el riesgo de resonancia como se muestra en la figura 6. Las frecuencias naturales se muestran en la figura 7 correspondiente, donde se observa que los modos 1 y 2 presentan comportamientos de flexión, el modo 3 corresponde a torsión primaria, mientras que los modos 4 y 5 combinan torsión y flexión. Finalmente, el modo 6 exhibe una flexión localizada con un componente torsional secundario.

MODO	FRECUENCIA NATURAL (Hz)
1	42.49
2	49.95
3	50.15
4	98.87
5	122.49
6	127.17

**Figura 6.** Resultado de la frecuencia natural del prototipo 2.



*Figura 7. Resultado del modo de vibración del prototipo 2.*

**2.4 Cálculo de carga máxima de la bicicleta:** Para evaluar la capacidad estructural de la bicicleta de carga eléctrica (e\_cargo\_bike), se aplicaron las diferentes cargas actuantes sobre el cuadro mediante un análisis por elementos finitos (FEA). La carga viva de 80 kg correspondiente al usuario y carga útil se distribuyó en 54 nodos, mientras que el peso de la batería (15 kg) se aplicó en 8 nodos localizados en el soporte del sistema eléctrico. Las cargas puntuales, aceleraciones, impactos y efectos de curva. Estas se representaron mediante un nodo por colector, por tratarse de acciones concentradas.

Con estas cargas aplicadas en el modelo, el esfuerzo máximo equivalente de Von Mises fue de 147.9 MPa. El material utilizado en la estructura es acero con un límite de fluencia  $S_y = 250$  MPa.

El factor de seguridad se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{\max}}$$

Reemplazando valores:

$$FS = \frac{250}{147.9} = 1.69$$

Por lo tanto, la estructura presenta un  $FS = 1.69$ .

Este valor confirma que la bicicleta resiste adecuadamente las cargas operativas previstas, manteniendo un margen de seguridad razonable sin sobredimensionar el diseño. La masa total considerada en el análisis fue de 220.62 kg, compuesta por: 25.62 kg del cuadro, 100 kg correspondientes a la persona, 15 kg de la batería y 80 kg de carga útil.

**2.5 Cálculo de rigidez torsional:** Adicionalmente, se realizó el análisis de rigidez torsional del cuadro en HyperMesh, aplicando unas fuerzas inversas de 250 N, correspondiente a los puntos donde está la base de carga. A partir del esfuerzo máximo en el eje Y, se determinó una rigidez torsional de  $1446 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ , valor que demuestra una mejor respuesta estructural frente a esfuerzos de torsión.

En la Tabla 5, correspondiente al cálculo de la rigidez torsional del cuadro, se presenta el resumen de los parámetros empleados en la evaluación, incluyendo las fuerzas aplicadas, las condiciones de apoyo, la deformación obtenida y el valor final de rigidez torsional determinado en el análisis.

**Tabla 5.** Resumen del cálculo de la rigidez torsional del cuadro.

Parámetro	Descripción
<b>Objetivo de la prueba</b>	Evaluar la resistencia del cuadro frente a momentos torsionales aplicados sobre la zona de carga.
<b>Fuerzas aplicadas</b>	2 fuerzas inversas de <b>250 N</b> en los puntos donde se apoya la base de carga (una hacia arriba y otra hacia abajo).
<b>Condiciones de apoyo</b>	Llanta delantera y trasera con restricciones X, Y y Z según modelo FEA.
<b>Deformación máxima medida</b>	Variación angular en el eje Y obtenida en HyperMesh.
<b>Momento torsor aplicado</b>	$M = F \times d$ (según distancia entre puntos de aplicación).
<b>Rigidez torsional obtenida</b>	<b>1446 N·m/°</b>
<b>Interpretación</b>	El cuadro presenta una buena capacidad para resistir torsión sin deformarse excesivamente, indicando estabilidad lateral y estructural.

**2.6 Cálculo de rigidez flexionante:** La carga se aplicó en la parte central del cuadro de la bicicleta, ubicando allí una fuerza vertical de 250 N. A partir de la deformación máxima registrada en el eje Y, se obtuvo una rigidez flexionante de  $13\,684,91\,N\cdot m/°$ , lo que confirma un buen desempeño estructural del cuadro frente a esfuerzos de flexión.

En la Tabla 6 se exponen los valores clave empleados en la evaluación de la rigidez flexionante del cuadro, mostrando de manera ordenada las cargas consideradas, el comportamiento estructural resultante y el valor final de rigidez obtenido en el análisis.

**Tabla 6.** Resumen del cálculo de la rigidez flexionante del cuadro.

Parámetro	Descripción
<b>Objetivo de la prueba</b>	Determinar la capacidad del cuadro para resistir flexión vertical en la zona central.
<b>Fuerza aplicada</b>	Carga puntual de <b>250 N</b> en el punto central del cuadro.
<b>Condiciones de apoyo</b>	Apoyos en ambas ruedas restringiendo desplazamientos según el modelo.
<b>Deformación máxima registrada</b>	Desplazamiento en el eje Y obtenido en el análisis FEA.
<b>Momento de flexión aplicado</b>	$M = F \times L$ (distancia desde el punto de carga a los apoyos).
<b>Rigidez flexionante obtenida</b>	<b>13 684.91 N·m/°</b>

Parámetro	Descripción
Interpretación	El cuadro muestra una alta resistencia a la flexión, lo que garantiza estabilidad estructural bajo carga vertical.

**2.7 Cálculo de fuerzas aplicadas en el modelo:** Las fuerzas utilizadas en el análisis provienen de las reacciones obtenidas en HyperMesh, considerando la masa total del sistema. Con ello se definieron las fuerzas normales: 821.6 N en la rueda delantera y 1090 N en la trasera. Para la aceleración máxima, el torque y el radio de la llanta permitieron obtener una fuerza de 585.7 N, equivalente a 2.65 m/s<sup>2</sup>. La desaceleración máxima adoptada fue de 0.6 g.

En la condición de curva, se calculó una fuerza centrífuga de 1297.76 N, distribuida en un 70 % hacia la zona del asiento (908.06 N) y un 30 % hacia el manillar (389.33 N), valores empleados en el modelo para representar la carga lateral.

**2.8 Evaluación de combinaciones de carga:** Para representar adecuadamente las condiciones reales de operación, se evaluaron cuatro combinaciones de carga que integran la carga muerta, la carga viva y los efectos dinámicos más representativos del comportamiento del sistema. Cada escenario permitió identificar los esfuerzos máximos y su correspondiente factor de seguridad.

- La Combinación 1, conformada por carga muerta + carga viva + desaceleración, registró un esfuerzo máximo de 147.9 MPa y un FS = 1.60.
- La Combinación 2, compuesta por carga muerta + carga viva + aceleración máxima + impacto en la llanta delantera, presentó un esfuerzo de 224.9 MPa con un FS = 1.11, concentrándose las tensiones en la zona frontal.
- La Combinación 3, integrada por carga muerta + carga viva + aceleración máxima + impacto en la llanta trasera, mostró un esfuerzo máximo de 220.7 MPa y un FS = 1.13, con la zona crítica en el soporte posterior.
- Por último, la Combinación 4, formada por carga muerta + carga viva + condición de curva hacia la derecha, obtuvo un esfuerzo de 182.4 MPa y un FS = 1.37, reflejando la distribución propia de cargas laterales.

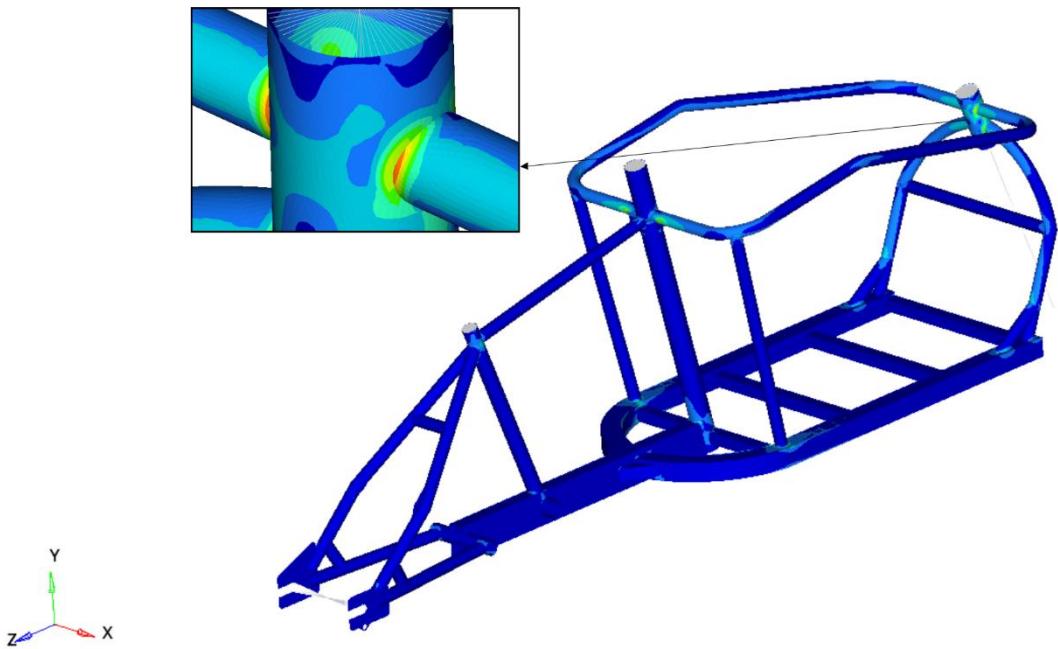
En la Tabla 7, correspondiente a la Tabla de Combinaciones de Carga, Descripción de Fuerzas y Factores de Seguridad, se reúnen de forma consolidada todos los datos y detalles

resumidos sobre las fuerzas aplicadas en cada escenario, junto con los valores de esfuerzo máximo y los factores de seguridad obtenidos en el análisis estructural.

En la Figura 8 se observa la ubicación del esfuerzo máximo de Von Mises correspondiente a la combinación 1, identificándose la zona crítica donde se concentra la mayor solicitud estructural del cuadro.

**Tabla 7. Combinaciones de carga y factores de seguridad del cuadro.**

Combinación	Descripción de cargas aplicadas	Detalle de fuerzas (N)	Esfuerzo máx. (MPa)	Factor de Seguridad (FS)
1	<b>Carga muerta + carga viva + desaceleración máxima.</b> Representa un frenado fuerte con el ciclista y la carga total actuando sobre el cuadro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reacciones normales: 821.6 N (delantera) y 1090 N (trasera).</li> <li>Peso total aplicado, usuario (100 kg) + carga (80 kg) + batería (15 kg) + cuadro (25.62 kg): <math>\approx</math> 2160 N.</li> <li>Desaceleración: <b>0.6 g</b>,</li> <li>Fuerza por aceleración: <b>585.7 N</b> (equiv. <math>2.65 \text{ m/s}^2</math>).</li> </ul>	<b>147.9</b> MPa	<b>1.60</b>
2	<b>Carga muerta + carga viva + aceleración máxima + impacto en la llanta delantera.</b> Simula una aceleración brusca y golpe frontal típico al subir una vereda o bache.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impacto concentrado en llanta delantera (carga puntual).</li> <li>Peso total aplicado <math>\approx</math> 2160 N.</li> </ul>	<b>224.9</b> MPa	<b>1.11</b>
3	<b>Carga muerta + carga viva + aceleración máxima + impacto en la llanta trasera.</b> Caso equivalente al anterior, pero con el golpe en la rueda posterior (subir obstáculo con la rueda de atrás).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuerza por aceleración: <b>585.7 N</b>.</li> <li>Impacto en la llanta trasera (carga puntual).</li> <li>Peso total <math>\approx</math> 2160 N.</li> </ul>	<b>220.7</b> MPa	<b>1.13</b>
4	<b>Carga muerta + carga viva + condición de curva hacia la derecha.</b> Reproduce la fuerza centrífuga generada al girar cargado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuerza centrífuga total: <b>1297.76 N</b>.</li> <li>Distribución lateral: 908.06 N hacia zona del asiento (70%). 389.33 N hacia el manubrio (30%).</li> <li>Peso total <math>\approx</math> 2160 N.</li> </ul>	<b>182.4</b> MPa	<b>1.37</b>



**Figura 8.** Ubicación del esfuerzo máximo de Von Mises para la combinación 1.

**2.9 Evaluación de resultados:** El Prototipo 2 evidenció un mejor desempeño estructural y dinámico, con menores deformaciones y mayor estabilidad. Las mejoras en el material y la geometría permitieron alcanzar una estructura más rígida, eficiente y segura, validando el rediseño como una base sólida para su futura fabricación y prueba experimental.

### 3. Comparación entre Prototipo 1 y Prototipo 2

#### 3.1 Diferencias en materiales y geometría

El Prototipo 2 utilizó tubos de acero en lugar de planchas de acero, logrando mayor resistencia con menor peso y una mejor distribución de esfuerzos. Además, se optimizó la geometría del cuadro, reforzando la zona frontal y bajando el centro de gravedad, lo que mejoró la estabilidad.

#### 3.2 Comparación de resultados estructurales

Los resultados del análisis por elementos finitos mostraron que el Prototipo 2 alcanzó frecuencias naturales superiores y menores deformaciones, evidenciando una mayor rigidez estructural.

#### 3.3 Análisis de mejora y desempeño final

El rediseño permitió cumplir con los objetivos de capacidad de carga, estabilidad y seguridad, validando al Prototipo 2 como una versión más eficiente y estructuralmente optimizada, adecuada para su aplicación en la movilidad urbana sostenible en Ecuador.

## Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, se determinó que el uso de planchas o láminas de acero en el cuadro de la bicicleta de carga no es recomendable, ya que incrementa el peso total y reduce la rigidez dinámica, aumentando el riesgo de resonancia estructural. Por el contrario, la utilización de tubos de acero, permitió obtener una estructura más ligera, resistente y estable, con frecuencias naturales más altas y una rigidez torsional de  $1446 \text{ N}\cdot\text{m}^{\circ}$ , lo que evidencia una mejora significativa en el comportamiento mecánico.

Por otro lado, se sugiere realizar la verificación del prototipo con normas como la ISO 4210 y la DIN 79010 una vez construido, con el fin de asegurar la seguridad, durabilidad y eficiencia estructural del diseño en futuras etapas.

Por lo tanto, se recomienda usar materiales adecuados y disponibles localmente, realizar simulaciones en cada fase del diseño y evitar materiales planos o pesados en el cuadro. Además, es importante seguir los estándares internacionales para garantizar un diseño seguro y funcional para el entorno urbano ecuatoriano.

Finalmente, en las zonas donde el análisis mostró mayores esfuerzos equivalentes de Von Mises, se recomienda considerar el uso de un acero estructural ASTM A500 (Grado B o C). Este material, al poseer un límite de fluencia superior a 300 MPa, permite aumentar el factor de seguridad y mejorar el comportamiento estructural en las regiones más críticas.

## Referencias bibliográficas

- Altair Engineering, Inc. (2022). *Altair® HyperMesh®* (2022.3). <https://altair.com>
- Álvarez, A. (2025). Conoce al detalle los diferentes tipos de cargo bikes. *Maillot Magazine*. <https://www.maillotmag.com/afondo/conoce-al-detalle-los-diferentes-tipos-de-cargo-bikes>
- Autodesk, Inc. (2025). *Fusion 360* (2604.1.48). <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>
- Autodesk, Inc. (2026). *AutoCAD 2026* (2026). <https://www.autodesk.com/products/autocad>
- Bello, A. (2019). *Nuevo Desarrollo de Bicicleta de Cargo Transformable*. <https://zaguan.unizar.es/record/85055/files/TAZ-TFG-2019-3365.pdf>
- Cía. General de Aceros. (2024, May 14). *Ficha-Tecnica-Acero\_Grado-Estructural\_A36*. Cía. General de Aceros. [https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha-Tecnica-Acero\\_Grado-Estructural\\_A36.pdf](https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha-Tecnica-Acero_Grado-Estructural_A36.pdf)
- Cyclelogistics. (2014). *Potential to shift goods transport from cars to bicycles in European cities*. <https://cyclelogistics.eu/>
- Deutsches Institut für Normung (DIN). (2020). *DIN 79010:2020-02. Cycles – Transportation bikes and cargo bikes – Requirements and test methods for single- and multi-track cycles*. <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-79010/315466805>
- DIPAC. (2020). *Catálogo DIPAC*. <https://www.dipacmanta.com/Catalogos-descargas/catalogo-2020.pdf>
- douze cycles. (2025). *Douze Cycles*. [douze-cycles](https://www.douze-cycles.com). <https://www.douze-cycles.com>
- Gordillo, N., & Riaño, L. (2024). *Diseño estructural de bicicleta eléctrica plegable*. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/8222987e-9c38-4eab-a0fe-f3aeb4c731eb/content>
- Herrera, J. (2022). *Universidad Nacional de Loja Dimensionamiento y construcción de una bicicleta eléctrica Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico*. <file:///C:/Users/A%20S%20U%20S/OneDrive/Escritorio/Dimensionamiento%20y%20construcción%20de%20una%20bicicleta%20eléctrica.pdf>
- International Organization for Standardization (ISO). (2023). *ISO 4210-2:2023 – Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/78077/7e7a9e3cceeb4c0c9bfa18d139de942b/ISO-4210-2-2023.pdf>
- Japanese Industrial Standard. (2001, January 1). *JIS D 9201: 2001 Bicycles -- Method of braking test (FOREIGN STANDARD)*. <https://store.accuristech.com/standards/jis-d>

9201-2001?product\_id=1252162&srsltid=AfmBOorchVypWtciF9AukCcOu-IExNQJ098P-\_koErO6jnwmKq2OO0Gg

Marincek Réat & Lurkin. (2024). Cargo bikes for personal transport: A user segmentation based on motivations for use. *International Journal of Sustainable Transportation*. <https://doi.org/10.1080/15568318.2024.2402753>

Municipio de Cuenca. (2015). *PLAN DE MOVILIDAD DE CUENCA 2015-2025 TOMO I* (Vol. 1). [https://www.cuenca.gob.ec/system/files/PMEP\\_CUENCA\\_2015\\_tomo\\_I.pdf](https://www.cuenca.gob.ec/system/files/PMEP_CUENCA_2015_tomo_I.pdf)

Ortega, R. (2019). *Así es la Política Nacional de Movilidad Urbana Sostenible de Ecuador - Latam Mobility*. <https://latamobility.com/asi-es-la-politica-nacional-de-movilidad-urbana-sostenible-de-ecuador/>

Paudel, M., & Yap, F. F. (2024). Analyzing the impact of bicycle geometry and cargo loading on the rideability and safety of cargo bikes: An investigative study. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29524>

Ramírez, S., & Sarango, Q. (2024). *Análisis De Prestaciones Mecánicas Del Chasis Y Basculante De Una Motocicleta Eléctrica Utilizando Software (CAE)*. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/15267/1/20782.pdf>

Regen Tech. (2025). *Bicicleta de carga Long John - Regen 02*. Regencargobikes. <https://regencargobikes.com/es/long-john-cargo-bike-regen-02>

Reid, Carlton. (2023). Toyota France To Sell E-Cargobikes In 170 Dealerships From October. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/carltonreid/2023/09/28/toyota-france-to-sell-e-cargobikes-in-170-dealerships-from-october>

Schrader, M., Kumar, N., Sørig, E., Yoon, S., Srivastava, A., Xu, K., Astefanoaei, M., & Collignon, N. (2024). *Urban context and delivery performance: Modelling service time for cargo bikes and vans across diverse urban environments*. <https://arxiv.org/pdf/2409.06730>

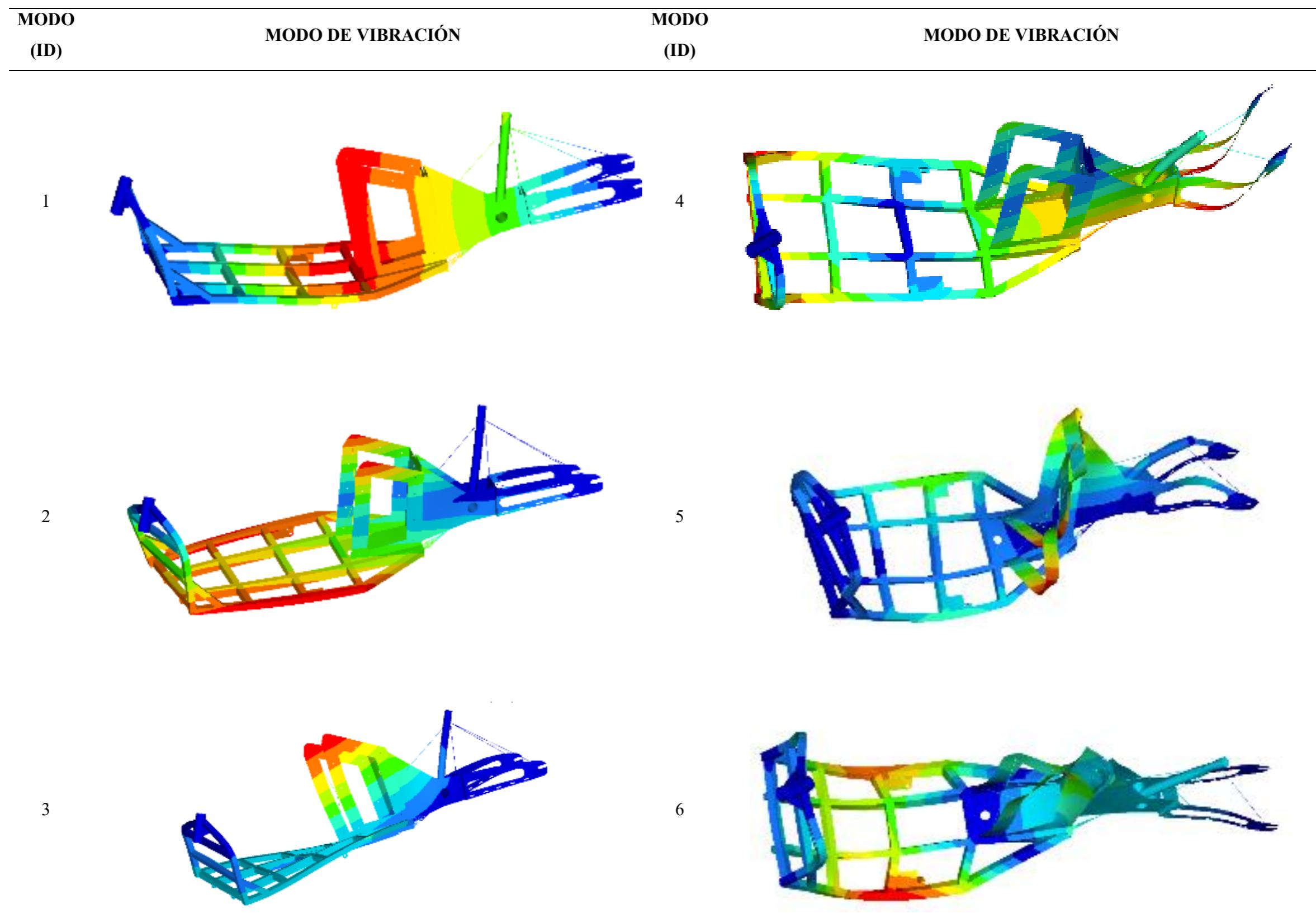
SE12. (2025, January 21). *Logroño inicia el reparto de mercancías en bicicleta para impulsar la descarbonización en el centro de la ciudad*. <https://cadenaser.com/rioja/2025/01/21/logrono-inicia-el-reparto-de-mercancias-en-bicicleta-para-impulsar-la-descarbonizacion-en-el-centro-de-la-ciudad-radio-rioja/>

Torres Brito, Peralta, D., Molina, J., & Andrés Alejandro. (2018). *PROPUESTA DE DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN CUADRO DE BICICLETA IMPULSADA POR UN MOTOR ELÉCTRICO, CON UN ESTUDIO Y ANÁLISIS QUE DETERMINE EL MATERIAL ALTAMENTE ADECUADO EXISTENTE EN EL PAÍS*. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2767/3/Presentación%20TESIS.pdf>

Velosuisse. (2023). *Fahrrad-Neuverkäufe 2022: Übersicht Fahrradmarkt Schweiz*. [https://www.velosuisse.ch/wp-content/uploads/2023/03/Fahrrad-Neuverkaufe\\_2022.pdf](https://www.velosuisse.ch/wp-content/uploads/2023/03/Fahrrad-Neuverkaufe_2022.pdf)

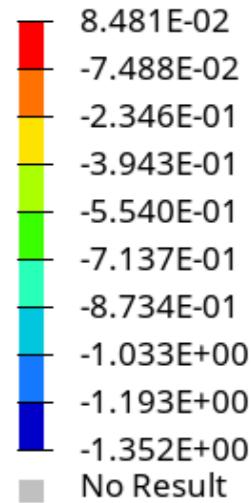
Yanocha, D., & Mackenzie, A. (2019). *The Electric Assist: LEVERAGING E-BIKES AND E-SCOOTERS FOR MORE LIVABLE CITIES*. [file:///C:/Users/A%20S%20U%20S/OneDrive/Escritorio/ITDP\\_The-Electric-Assist\\_-Leveraging-E-bikes-and-E-scooters-for-More-Livable-Cities.pdf](file:///C:/Users/A%20S%20U%20S/OneDrive/Escritorio/ITDP_The-Electric-Assist_-Leveraging-E-bikes-and-E-scooters-for-More-Livable-Cities.pdf)

Anexos

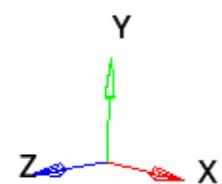


*Anexo 1. Resultado del modo de vibración del prototipo 1.*

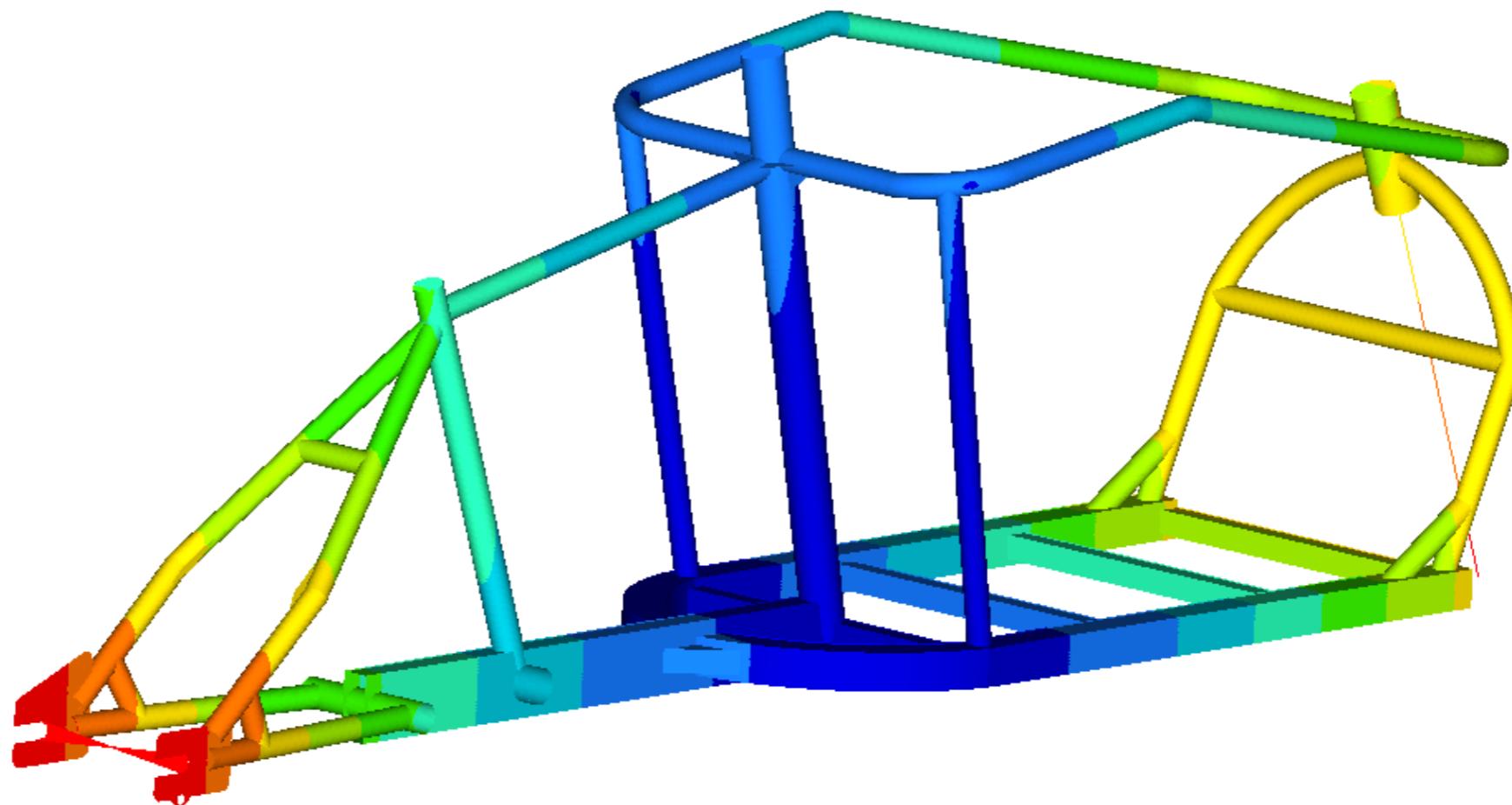
Contour Plot  
Displacement(Y)  
Analysis system



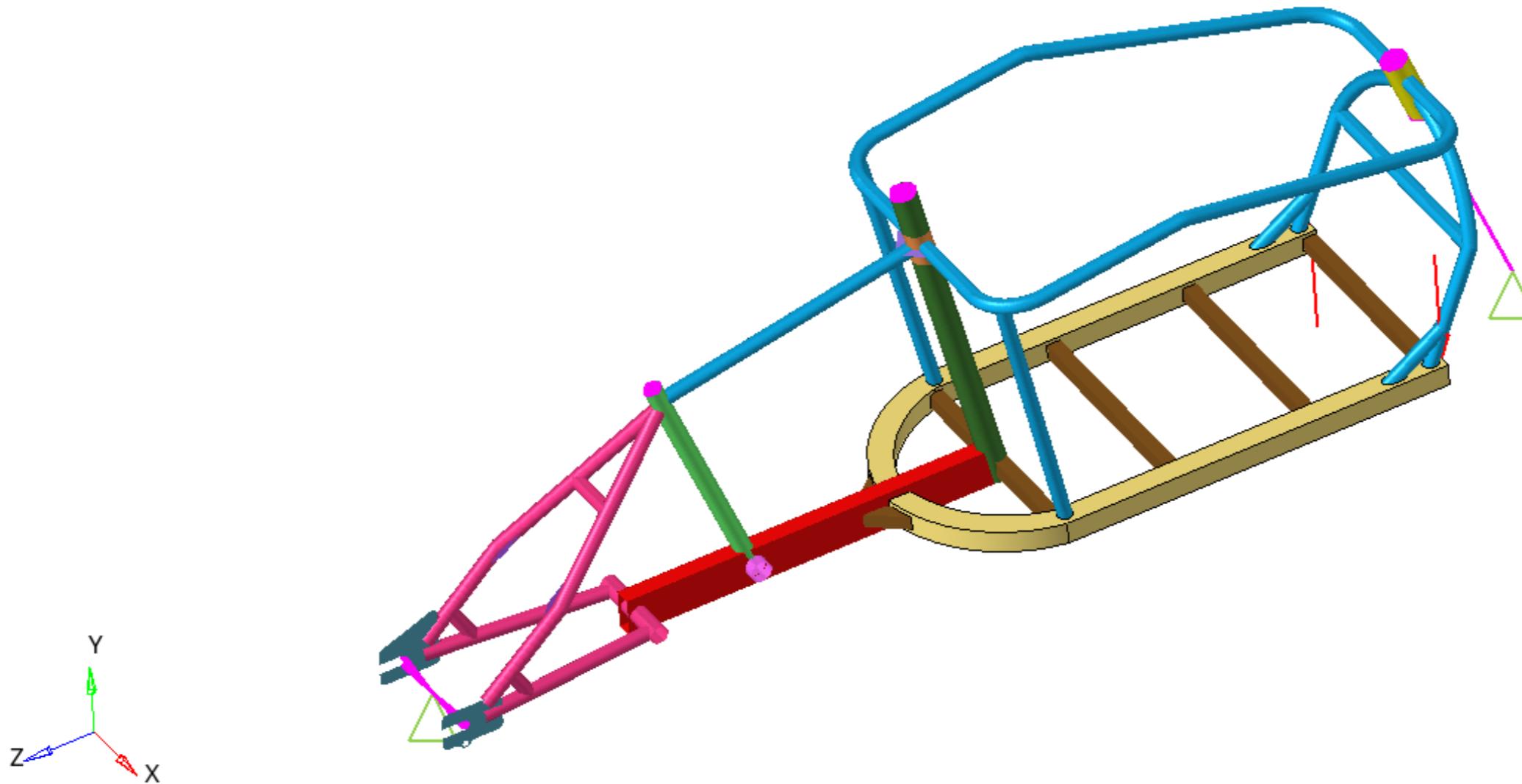
Max = 8.481E-02  
Grids 738698  
Min = -1.352E+00  
Grids 790940



1: 1  
Subcase 3 (Normales) : Static Analysis : Frame 0

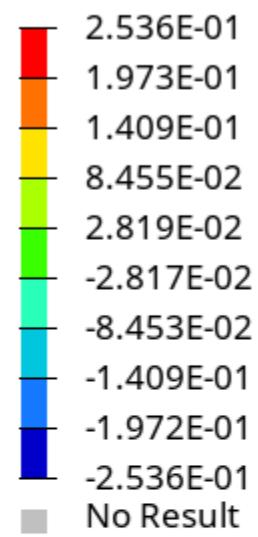


*Anexo 2. Deformación máxima en el eje Y bajo la aplicación de cargas vivas y cargas muertas en el cuadro del prototipo 2.*

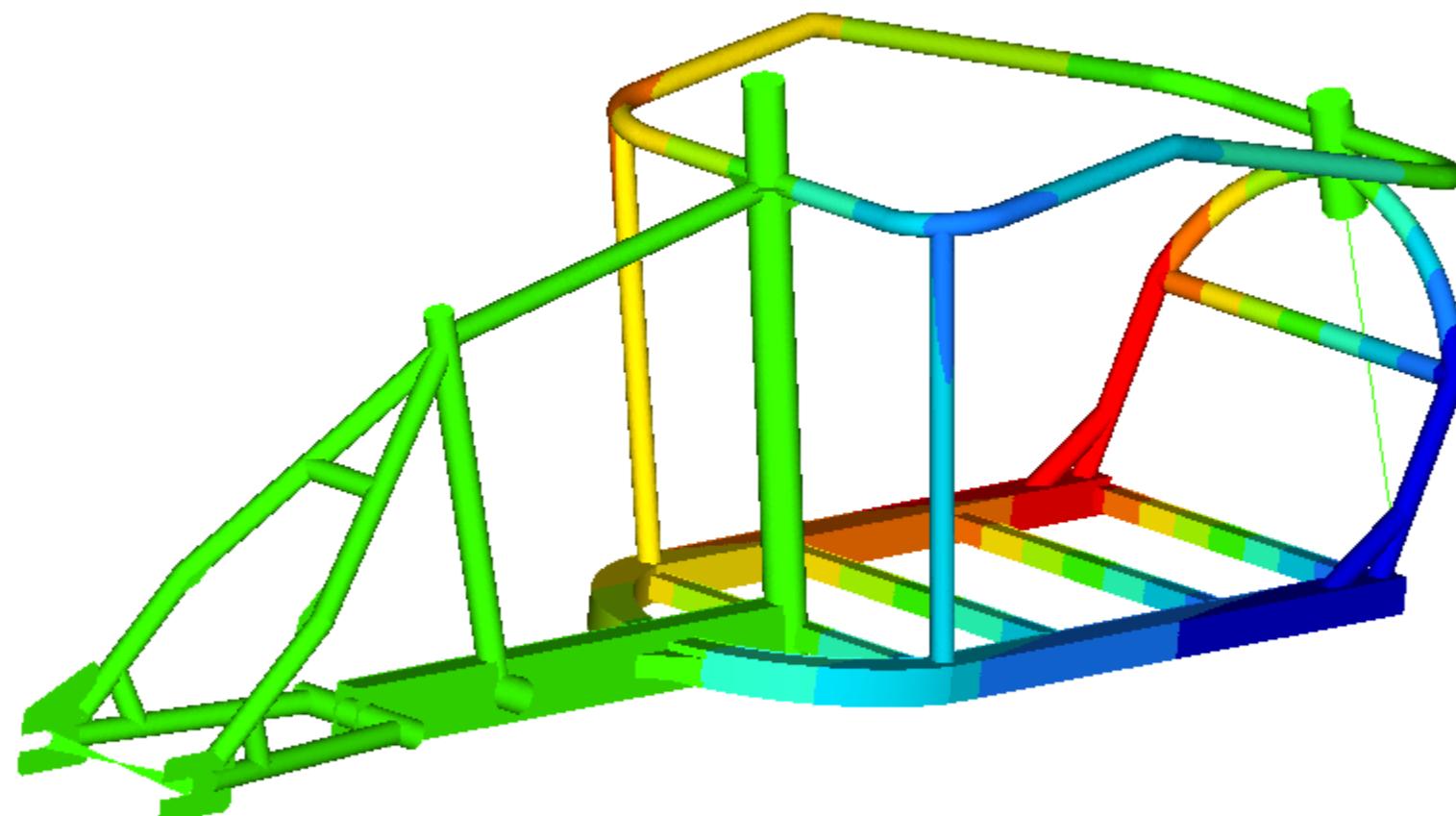


### *Anexo 3. Aplicación de las fuerzas en el cuadro del prototipo 2 para el cálculo de la rigidez torsional.*

Contour Plot  
Displacement(Y)  
Analysis system

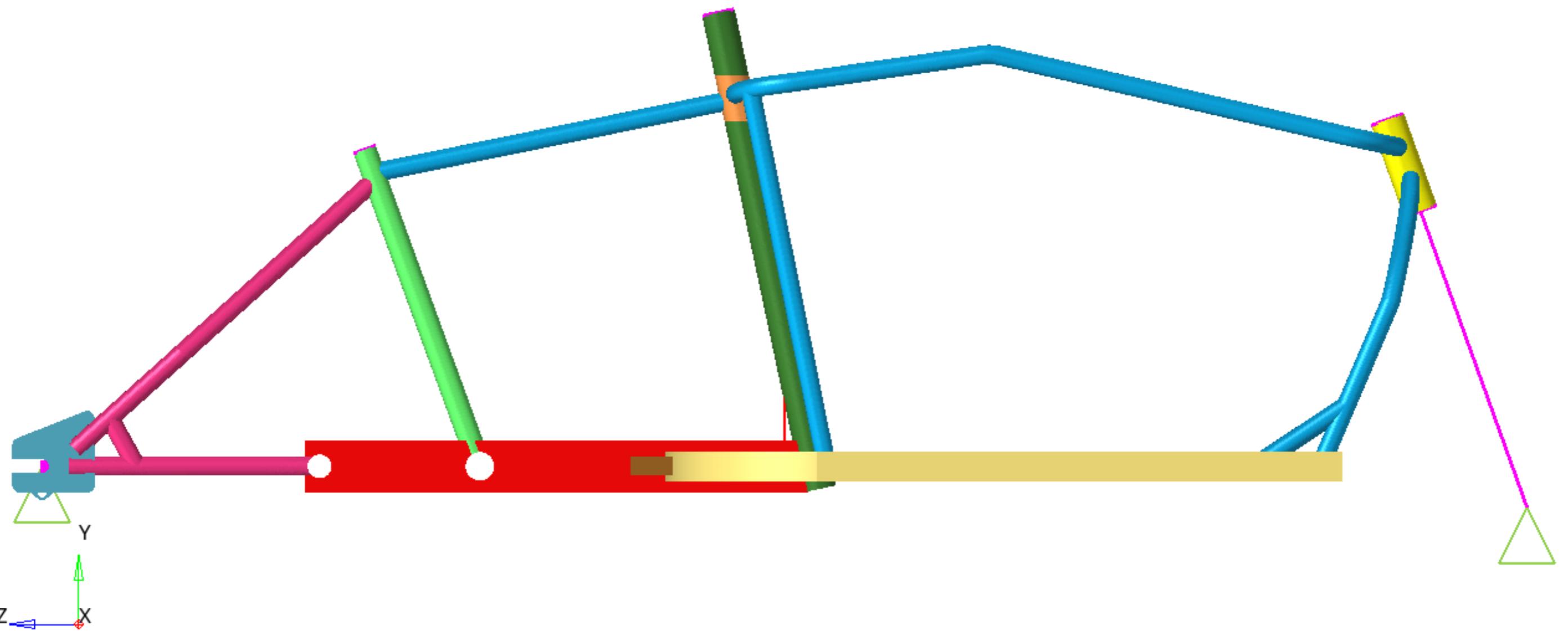


Max = 2.536E-01  
Grids 482798  
Min = -2.536E-01  
Grids 641909



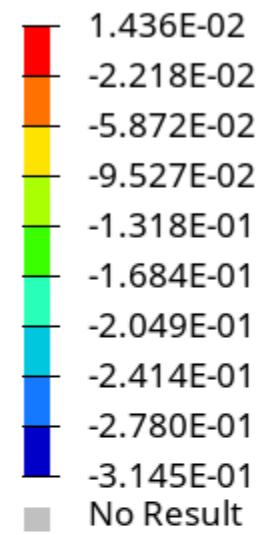
1:1  
Subcase 5 (Analisis torsional) : Static Analysis : Frame 0

*Anexo 4. Deformación máxima en el eje Y obtenida para el cálculo de la rigidez torsional del prototipo 2.*



*Anexo 5. Aplicación de la fuerza para el cálculo de la rigidez flexionante del cuadro del prototipo 2.*

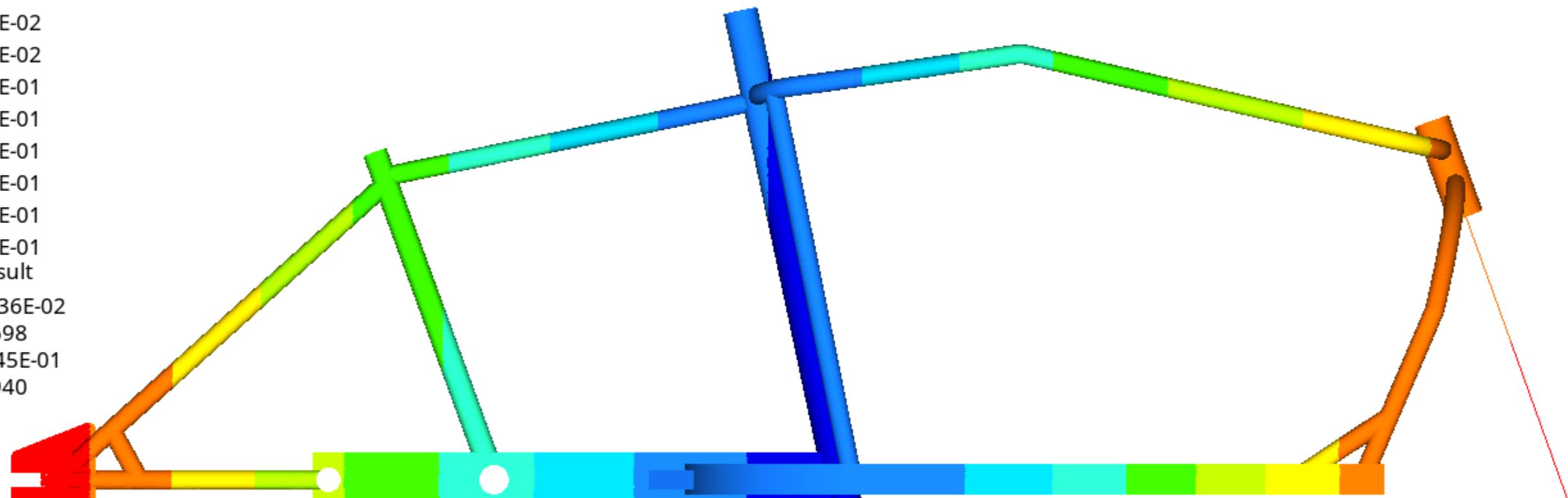
Contour Plot  
Displacement(Y)  
Analysis system



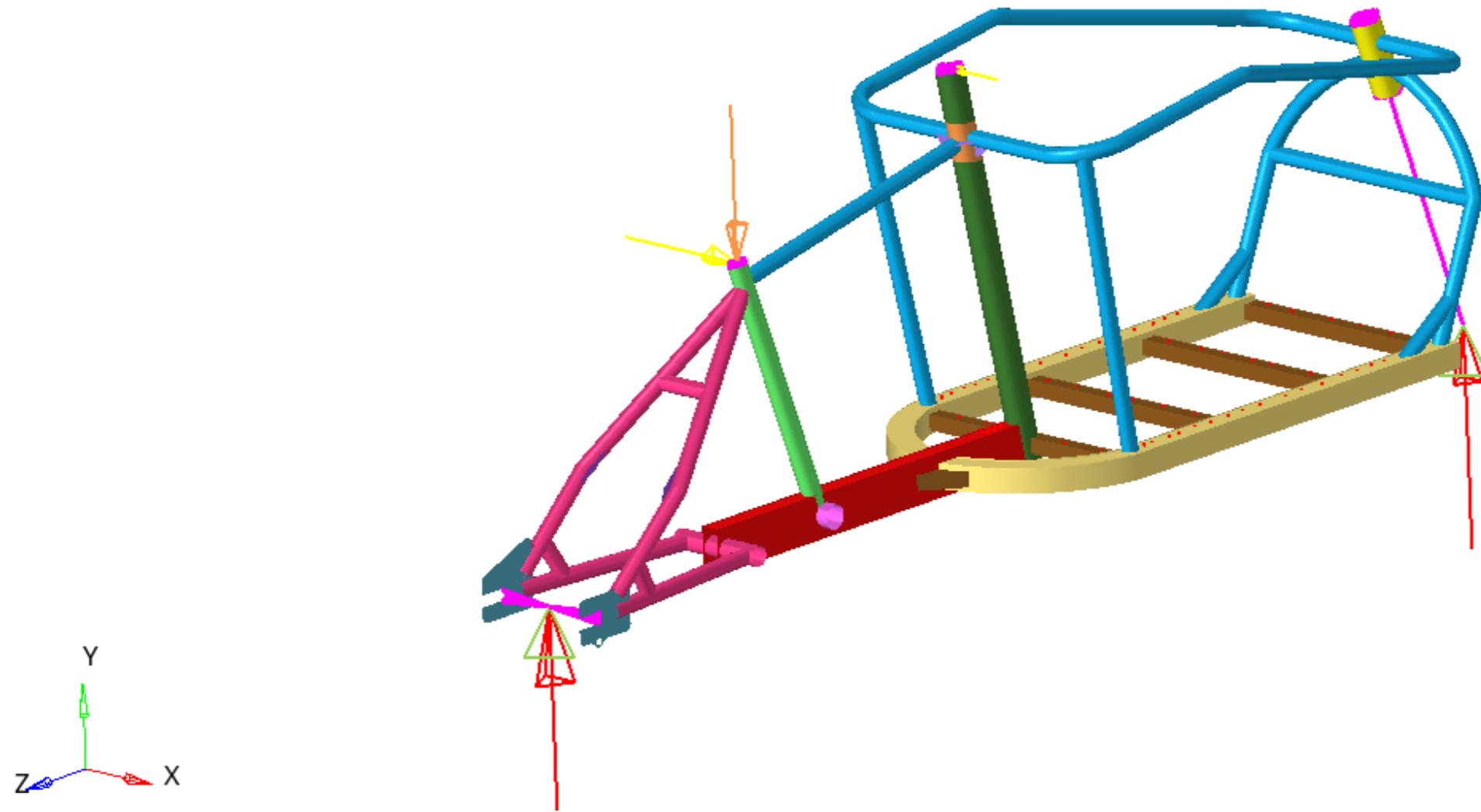
Max = 1.436E-02  
Grids 738698  
Min = -3.145E-01  
Grids 790940



1:1  
Subcase 5 (Analisis torsional) : Static Analysis : Frame 0

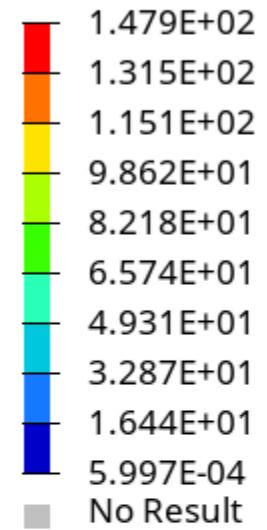


*Anexo 6. Deformación máxima en el eje Y correspondiente al cálculo de la rigidez flexionante del prototipo 2.*

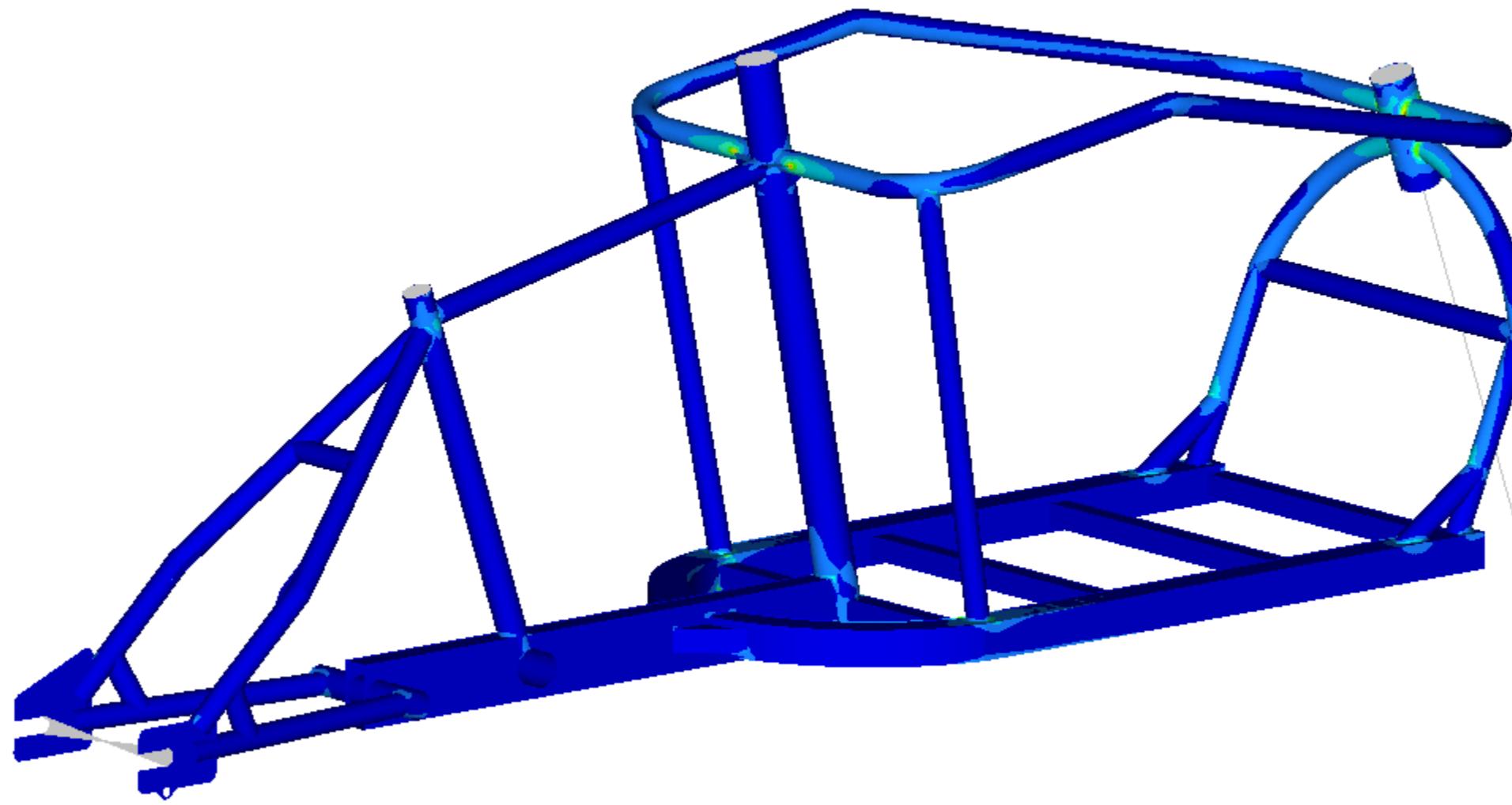
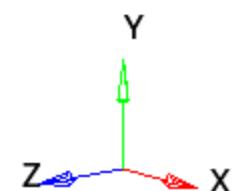


*Anexo 7. Aplicación de las cargas de las combinaciones en el cuadro – Prototipo 2.*

Contour Plot  
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max)  
Analysis system  
Simple Average



Max = 1.479E+02  
Grids 543937  
Min = 5.997E-04  
Grids 741236



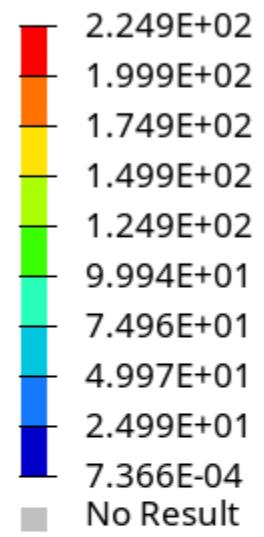
Subcase 5 (Combi.1) : Static Analysis : Frame 0

1:1

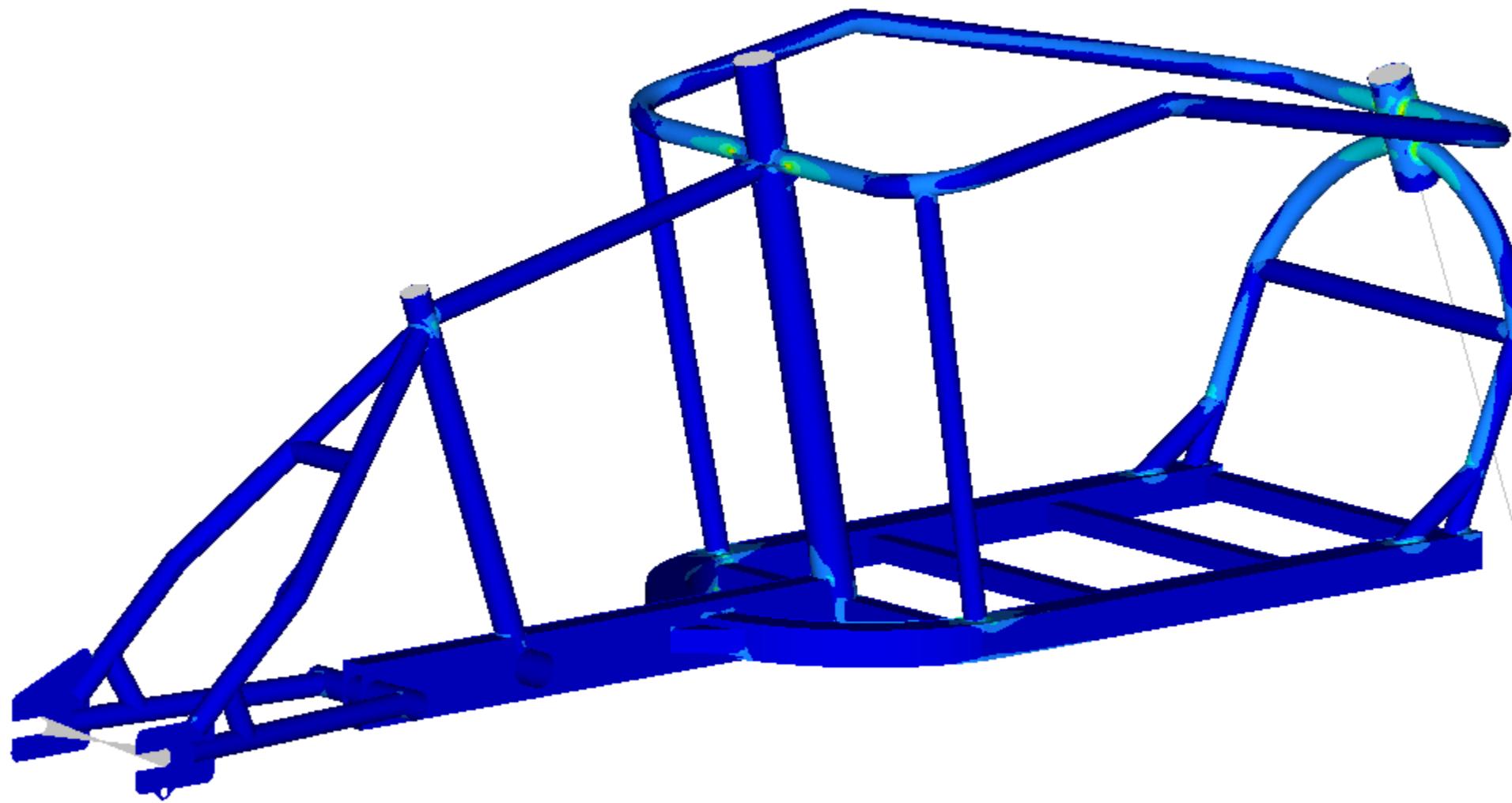
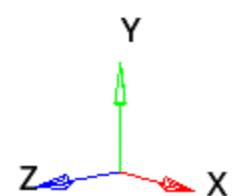
*Anexo 8. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 1 – Prototipo 2.*

Contour Plot  
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max)

Analysis system  
Simple Average



Max = 2.249E+02  
Grids 543936  
Min = 7.366E-04  
Grids 741236

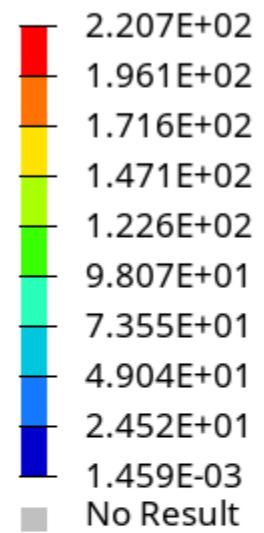


1:1  
Subcase 6 (Combi.2) : Static Analysis : Frame 0

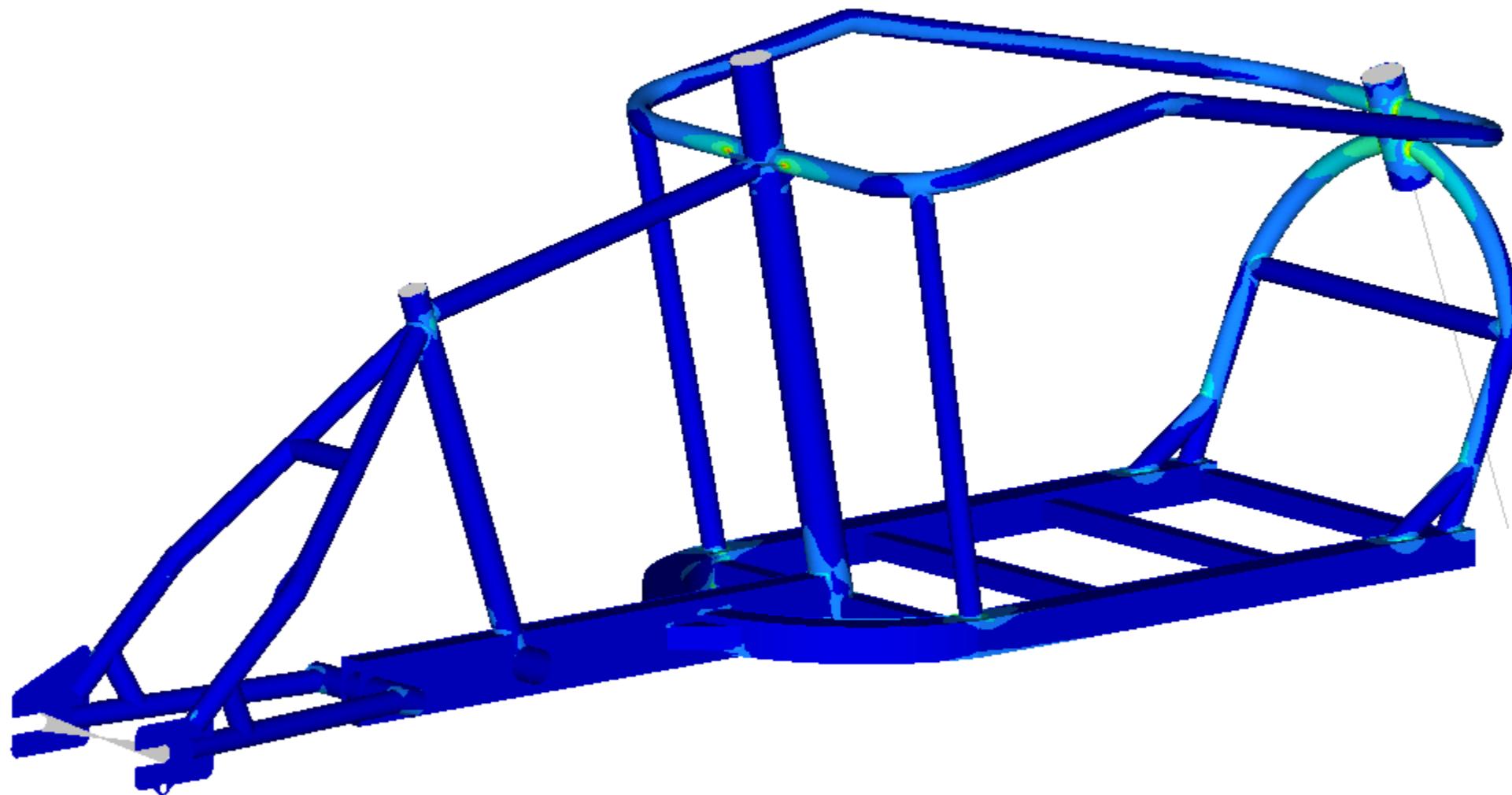
*Anexo 9. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 2 – Prototipo 2.*

Contour Plot  
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max)

Analysis system  
Simple Average



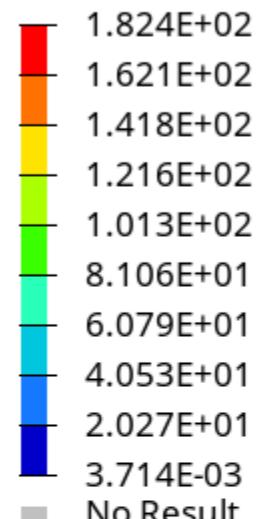
Max = 2.207E+02  
Grids 543937  
Min = 1.459E-03  
Grids 738438



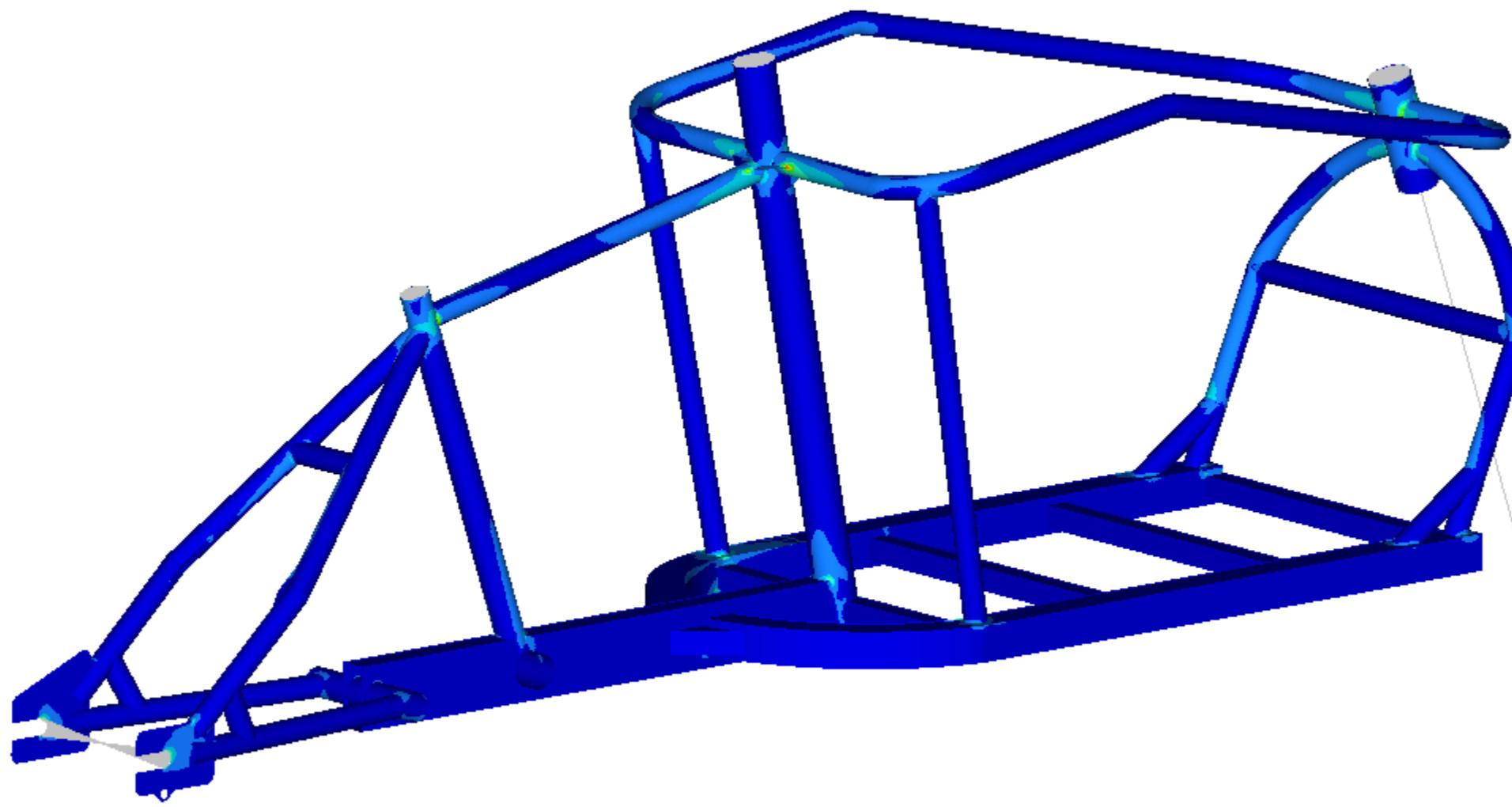
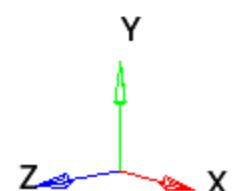
1:1  
Subcase 7 (Combi.3) : Static Analysis : Frame 0

*Anexo 10. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 3 – Prototipo 2.*

Contour Plot  
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises, Max)  
Analysis system  
Simple Average



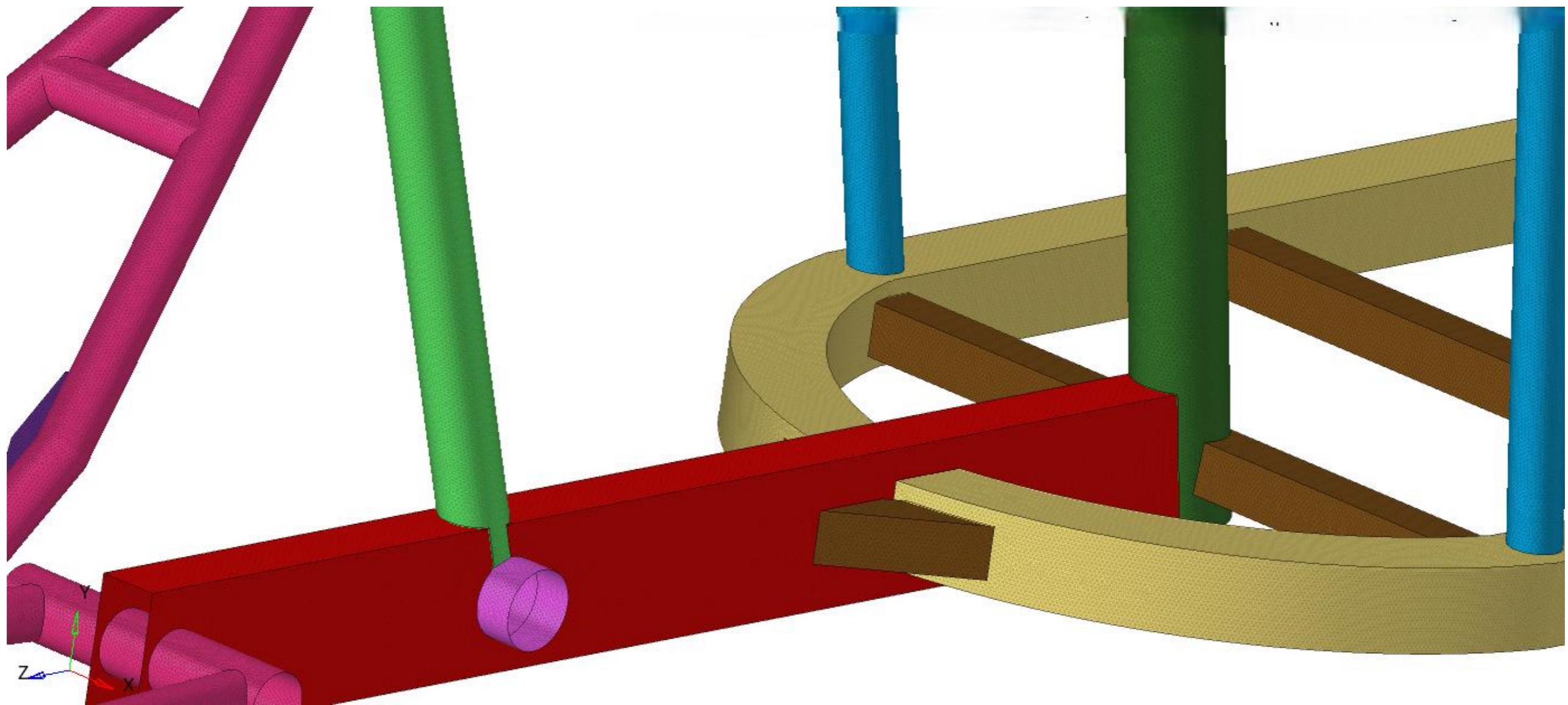
Max = 1.824E+02  
Grids 515412  
Min = 3.714E-03  
Grids 741236



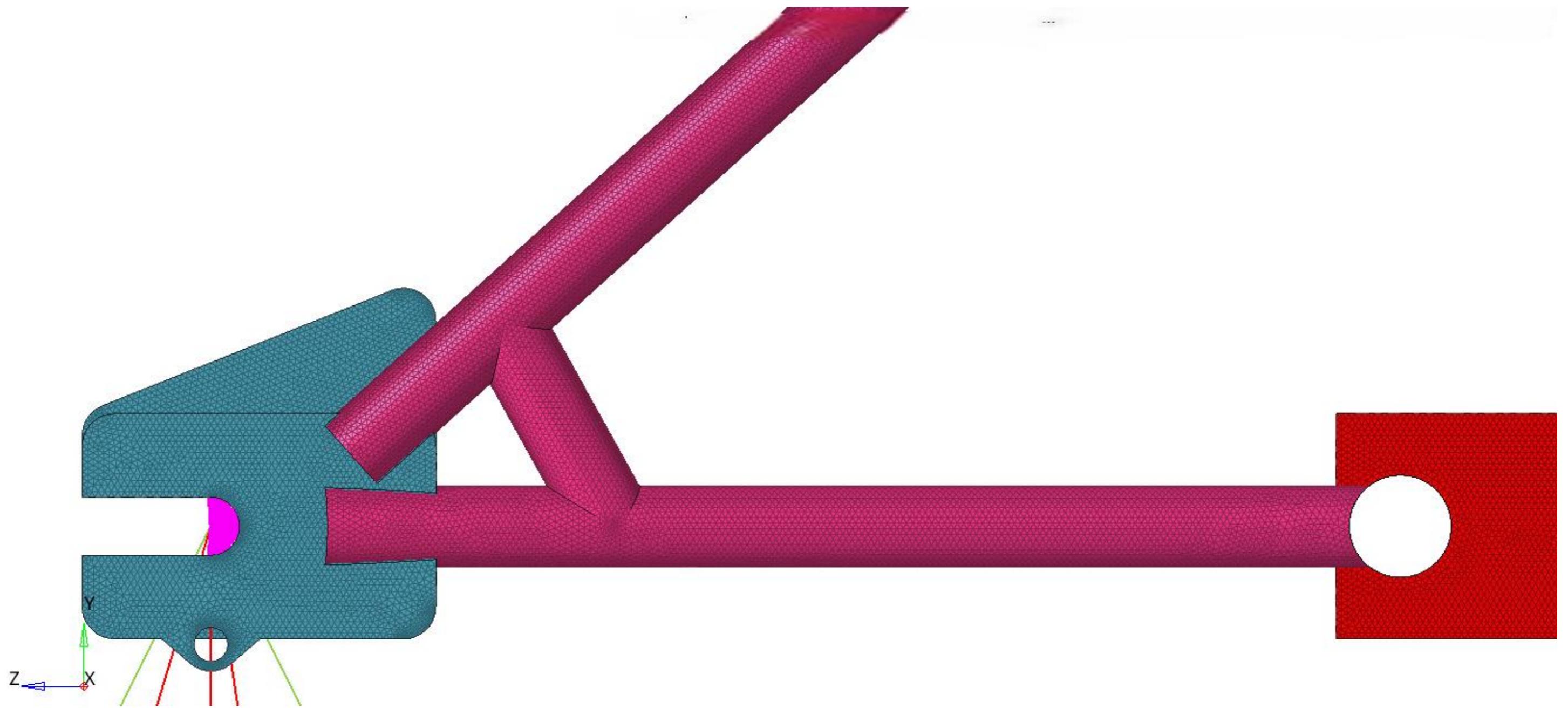
Subcase 8 (Combi.4) : Static Analysis : Frame 0

1:1

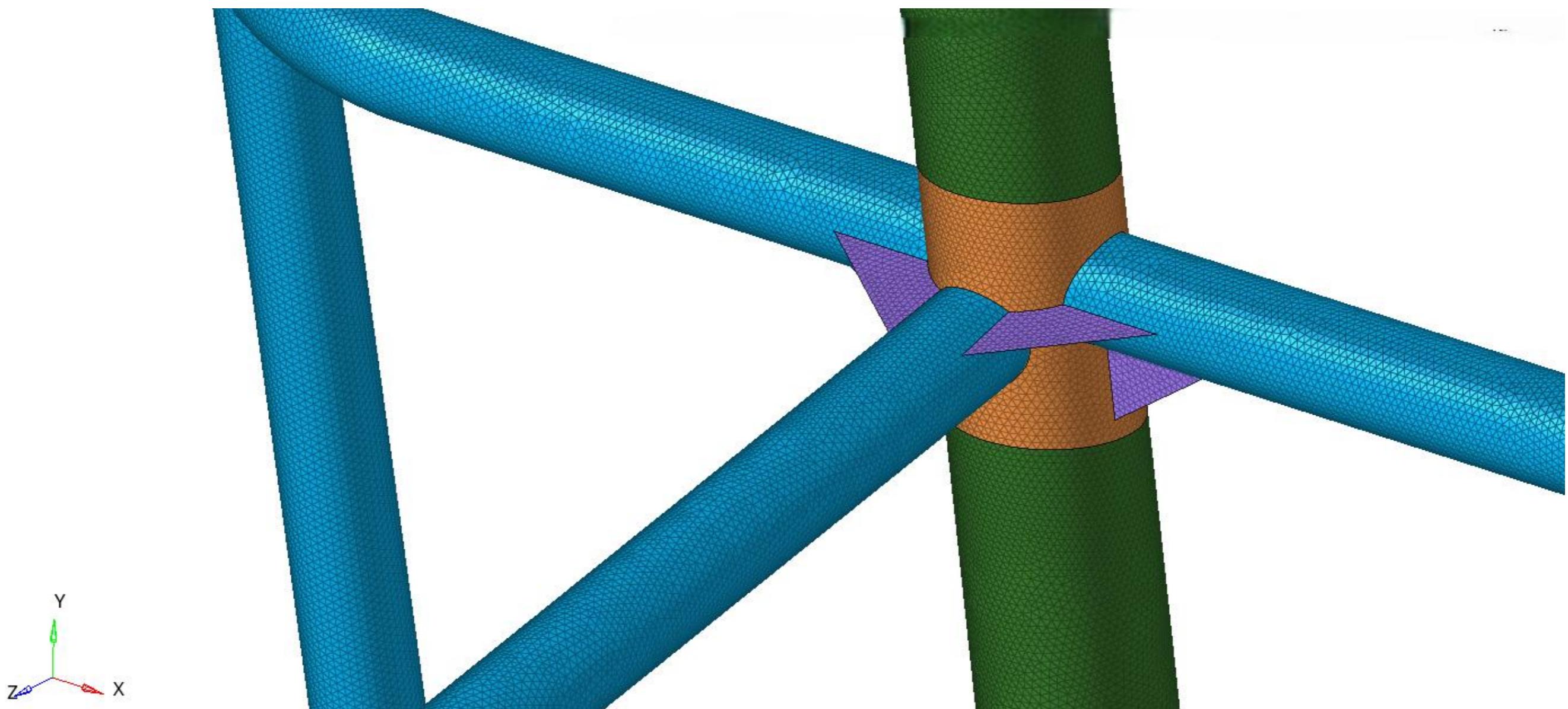
*Anexo 11. Esfuerzo de Von Mises máximo correspondiente a la combinación 4 – Prototipo 2.*



*Anexo 12. Estructura de la malla del cuadro de la bicicleta, con separación de espesores y configuración PSHELL – Prototipo 2.*



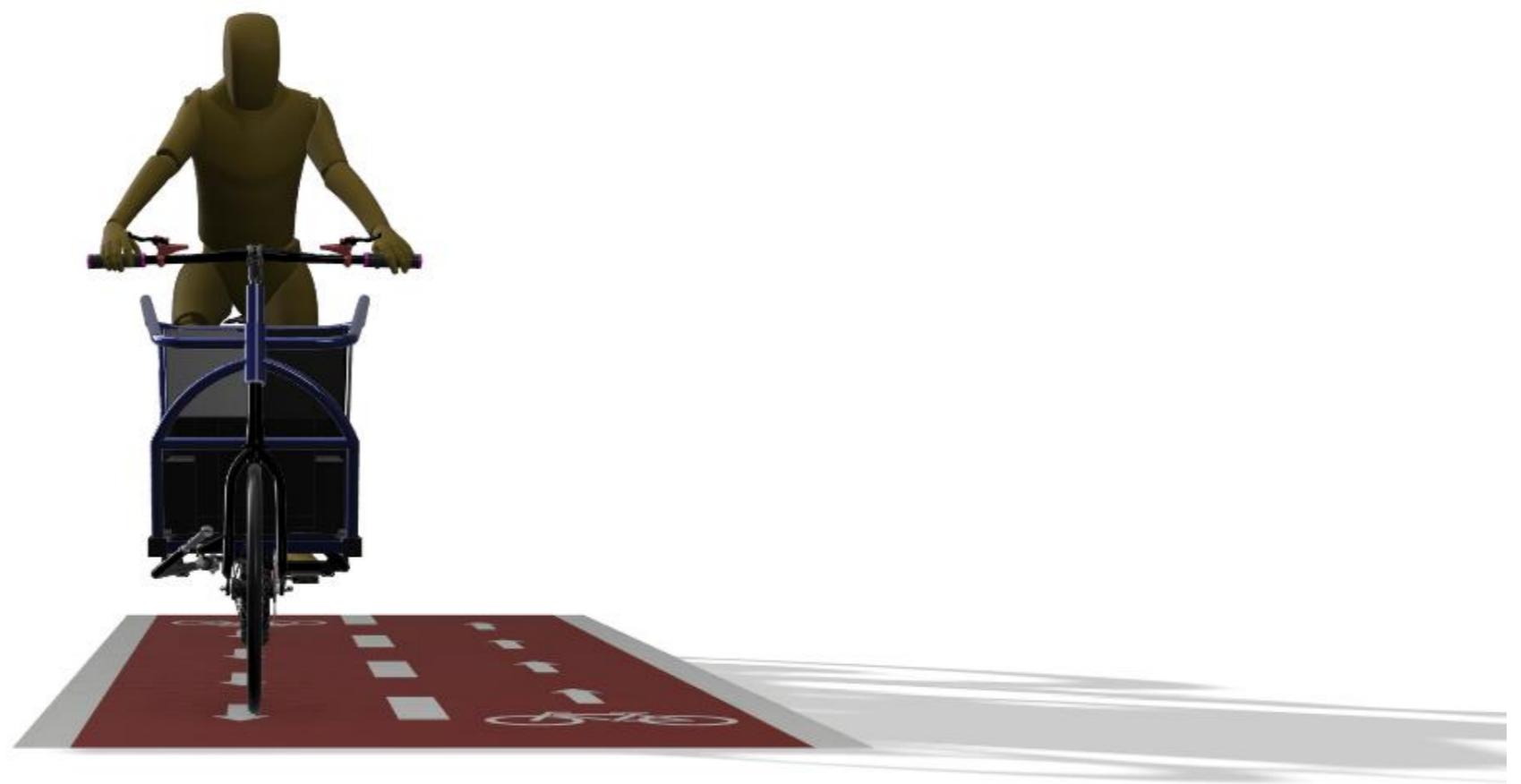
*Anexo 13. Primera mejora aplicada al diseño estructural del cuadro – Prototipo 2.*



*Anexo 14. Segunda mejora aplicada al diseño estructural del cuadro – Prototipo 2.*



*Anexo 15. Vista general del conjunto (Prototipo 2).*



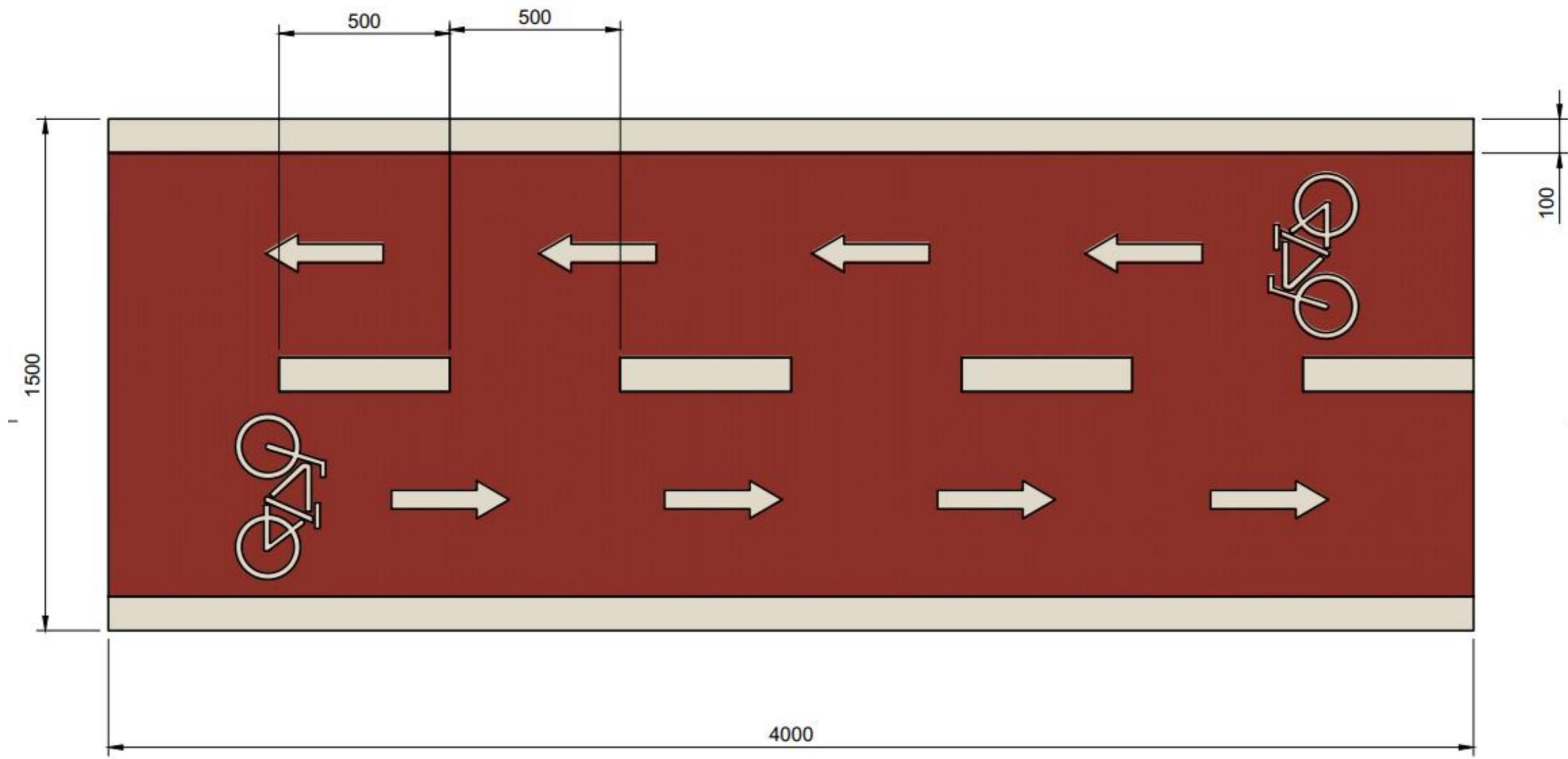
*Anexo 16. Vista frontal de la bicicleta (Prototipo 2).*



*Anexo 17. Vista de los componentes del sistema (Prototipo 2).*



*Anexo 18. Zona destinada al equipamiento eléctrico (Prototipo 2).*



*Anexo 19. Dimensiones de la ciclovía.*



*Anexo 20. Renderizado de la e\_cargo\_bike en la ciclovía.*



*Anexo 21. Estructura del chasis de la e\_cargo\_bike del prototipo 1.*



*Anexo 22. Vista lateral de la e\_cargo\_bike del prototipo 1.*



*Anexo 23. Sistema de soporte para mantener estable la bicicleta del prototipo 1.*



*Anexo 24. Cuadro de acero correspondiente al prototipo 1 de la bicicleta de carga.*



*Anexo 25. Sistema de dirección del prototipo 1.*



**Anexo 26.** Vista posterior del sistema de dirección prototipo 1.



**Anexo 27.** Llanta delantera con la junta de conexión del prototipo 1.



*Anexo 28. Vista lateral del prototipo 1 con el Dummy.*



*Anexo 29. Vista frontal de la bicicleta de carga del prototipo 1.*



**Anexo 30.** Vista posterior de la bicicleta de carga del prototipo 1.



**Anexo 31.** Bicicleta de carga del prototipo 1 sin elementos en la zona de carga.



**Anexo 32.** Bicicleta de carga del prototipo 1 con un contenedor especial ajustado a su estructura.



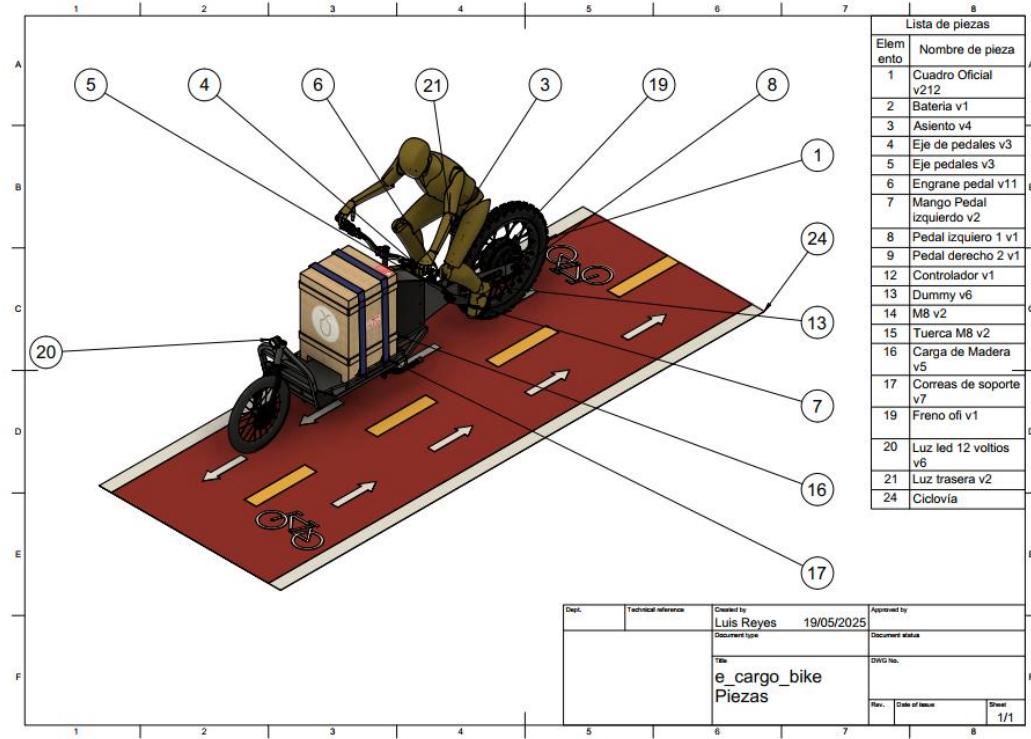
**Anexo 33.** Bicicleta de carga del prototipo 1 transportando un bloque motor.



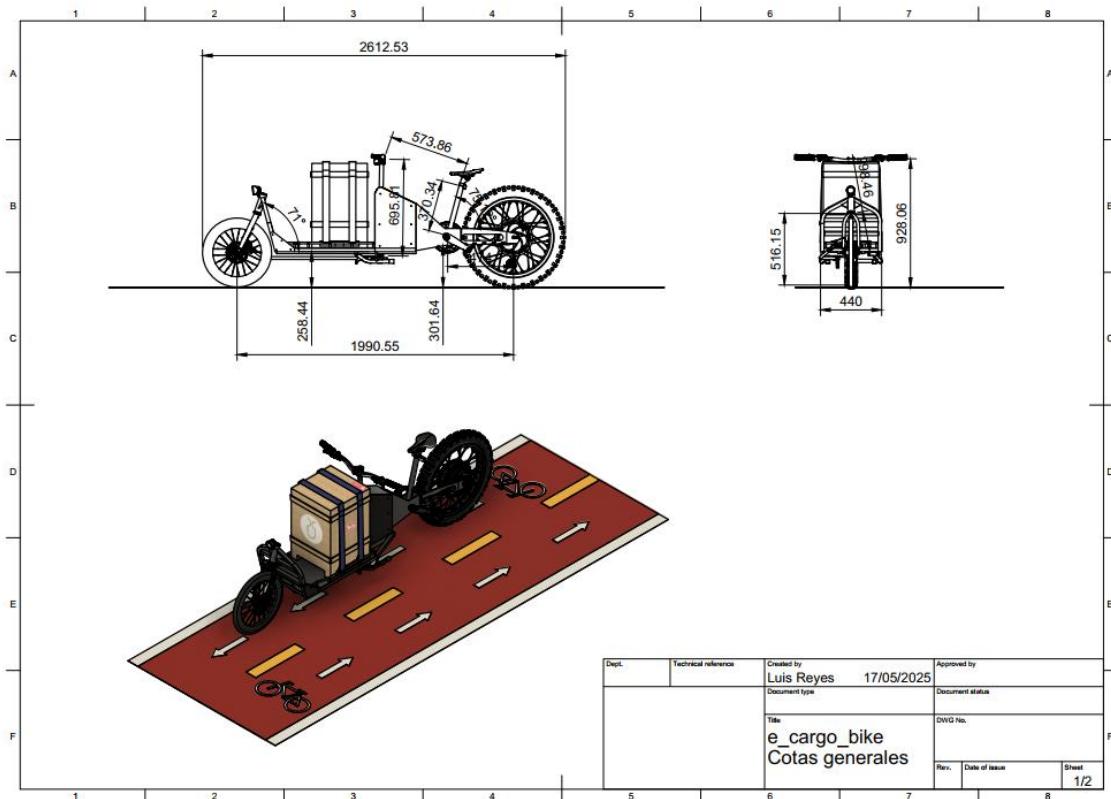
*Anexo 34. Bicicleta de carga del prototipo 1 con un contenedor comercial estándar.*



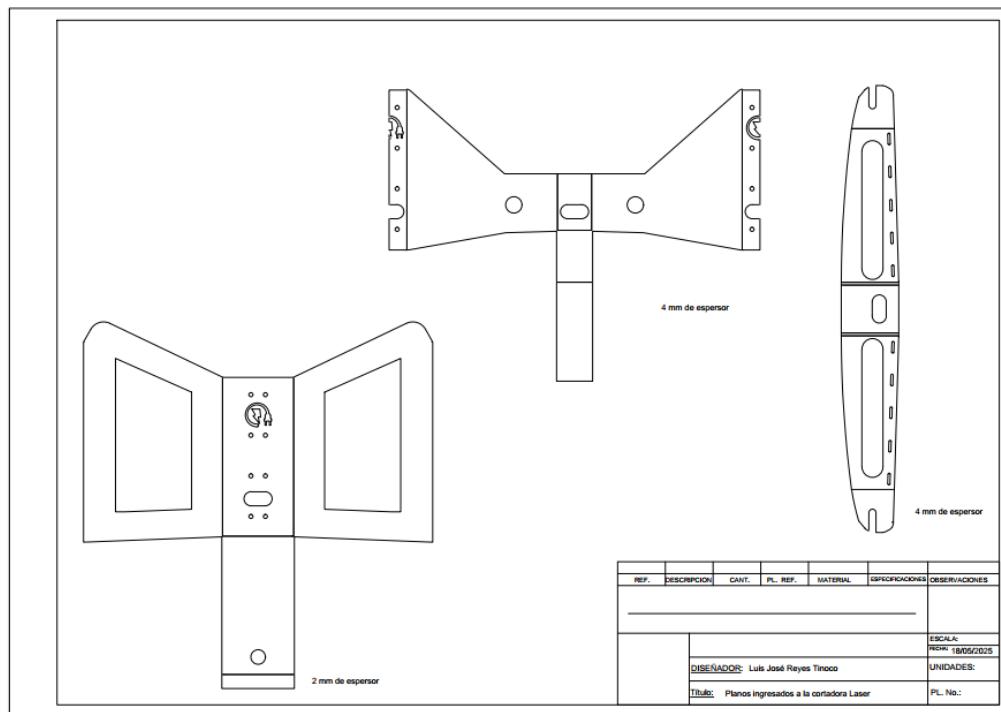
*Anexo 35. Bicicleta de carga del prototipo 1 transportando una caja asegurada con cintas de sujeción.*



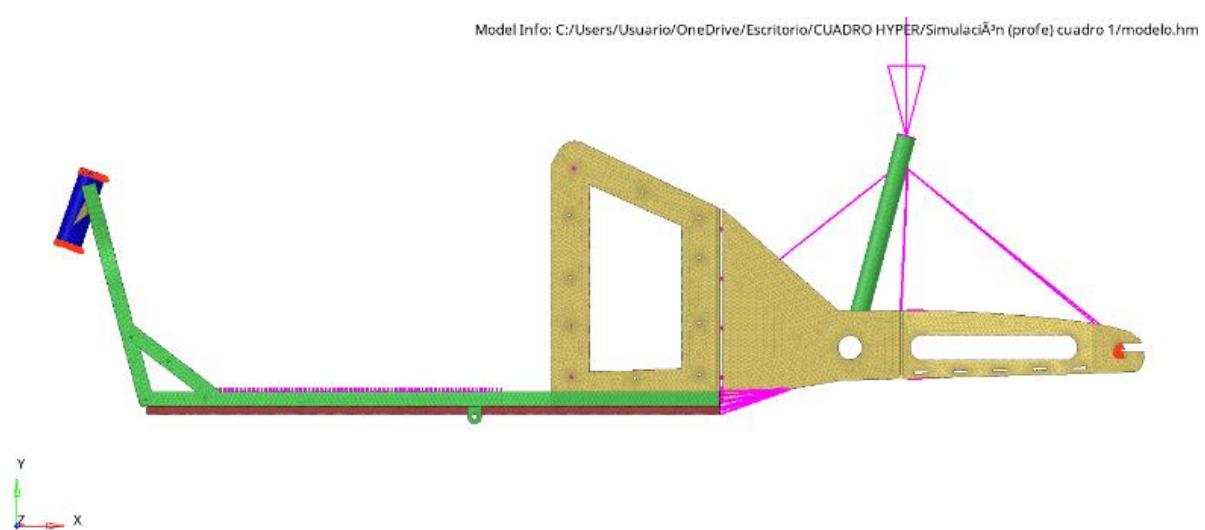
*Anexo 36. Vista en plano del conjunto estructural y componentes del prototipo 1.*



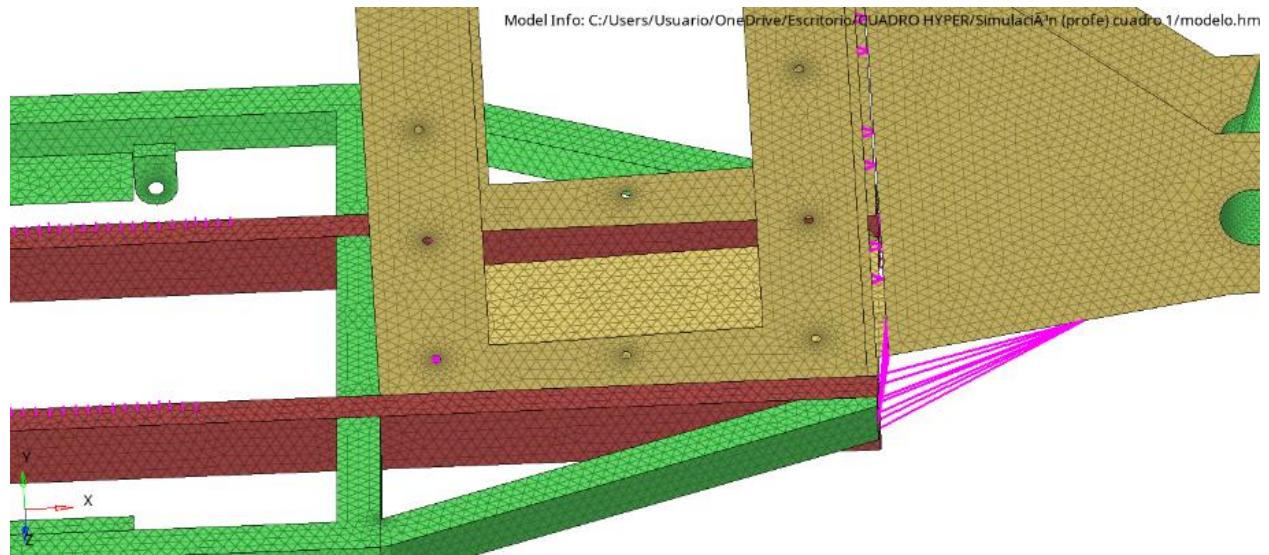
*Anexo 37. Esquema de cotas principales y geometría global del prototipo 1.*



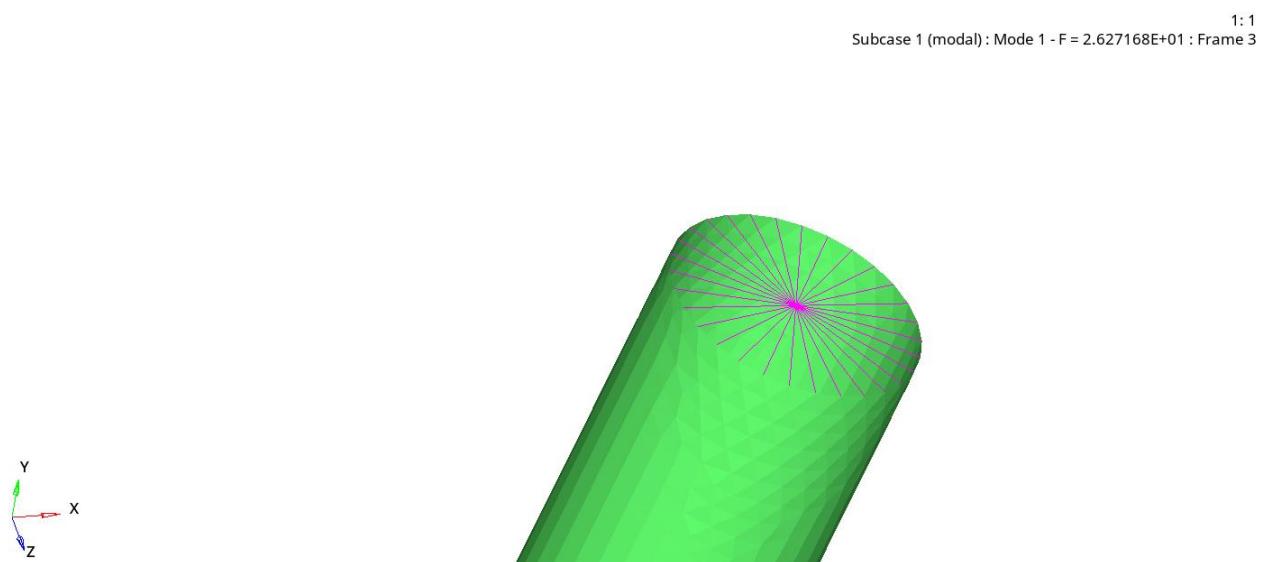
**Anexo 38. Archivos de trazado y diagramas de corte CNC utilizados en la manufactura del prototipo 1.**



### **Anexo 39. Modelo del cuadro de la bicicleta del prototipo 1 en el software HyperMesh.**



*Anexo 40. Puntos fijos aplicados al cuadro de la bicicleta del prototipo 1.*



*Anexo 41. Zona de aplicaciÃ³n de la carga correspondiente al peso del usuario en el prototipo 1.*



*Anexo 42. Logotipo propuesto para la e\_cargo\_bike.*