 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Análisis estructural de un vehículo de tracción humana para la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018.

Sebastián Bustamante Ospina

Tecnología Electromecánica

Sebastián Vélez García

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

OCTUBRE DE 2018

MEDELLÍN

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Este proyecto busca diseñar una jaula antivuelco para un vehículo de tracción humana (VTH) tipo tadpole con sistema tilting que representará a la institución en la competencia de vehículos de tracción humana Antioquia 2018. Para construir dicha jaula, se sabe que es muy importante hacer un análisis estructural, esto se ha visto evidenciado en los proyectos presentados en los años anteriores por otras universidades que han participado en diferentes competencias similares. Es por esto, que para el diseño de la jaula antivuelco se realizará un análisis estructural mediante el uso del método de elementos finitos con el fin de determinar las características de la jaula de tal forma que cumpla con los requisitos del concurso y brinde seguridad a la persona que lo esté manejando en caso de colisiones o volcamientos imprevistos.

Para cumplir el objetivo del diseño de la jaula antivuelco, se presentarán varios diseños CAD a los cuales se les realizará un estudio de independencia de malla previo a las simulaciones finales con tal de definir a partir de cuántos elementos los resultados obtenidos son independientes de la discretización. En lo referido a las simulaciones, las estructuras serán sometidas a unas cargas dispuestas en el reglamento del concurso y se entrarán a analizar los esfuerzos, las deformaciones y el factor de seguridad presentados por cada una de las estructuras con tal de definir cuál presenta el mejor comportamiento.

La jaula antivuelco seleccionada se comporta como se esperaba en las pruebas de resistencia mecánica y volcamiento aplicadas en la competencia, obteniendo los puntajes máximos que se podían obtener para cada ítem. Se infiere entonces que las simulaciones y análisis efectuados son aptos y conllevaron a resultados valederos.

Palabras clave: jaula antivuelco, vehículo de tracción humana, VTH, análisis estructural, método de elementos finitos, esfuerzos, deformaciones, factor de seguridad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco principalmente al profesor Sebastián Vélez García por la permanente ayuda y disposición en el desarrollo del trabajo de grado.

A todos los compañeros del semillero de investigación de electromecánica dirigido por Sebastián Vélez García, por su ayuda y empatía brindada en todo momento.

Al departamento de bibliotecas, especialmente a sus bibliotecólogos por la ayuda brindada para la realización de un buen trabajo bajo las normas establecidas.

A los compañeros y encargados del laboratorio de modelado por permitirme desarrollar las simulaciones en los computadores allí presentes bajo los programas allí instalados y auxiliarme en los momentos en los que había duda.

A los laboratoristas de soldadura y procesos mecánicos por la disposición para la utilización de los componentes allí presentes y su ayuda brindada.

Agradezco especialmente a mis padres y familiares, qué, aunque no tienen apoyo directo con el trabajo, sin su confianza y su apoyo, difícilmente hubiera sido posible la realización de este.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

<i>VTH</i>	Vehículo de tracción humana
<i>CAD</i>	Computer assisted desing (Diseño asistido por computador)
<i>FS</i>	Factor de seguridad
<i>FEM</i>	Finite element design (Diseño de elementos finitos)
<i>FEA</i>	Finite element analysis (Análisis de elementos finitos)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.2	OBJETIVOS.....	10
1.2.1	<i>Objetivo general</i>	10
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	10
1.3	ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO.....	10
2.	MARCO TEÓRICO.....	12
2.1	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA.....	12
2.1.1	<i>Tensión de Von Mises</i>	13
2.1.2	<i>Deformación: desplazamiento</i>	15
2.1.3	<i>Factor de seguridad</i>	16
2.2	VEHÍCULOS DE TRACCIÓN HUMANA (VTH).....	17
2.3	SIMULACIÓN ESTRUCTURAL.....	19
2.4	ESTADO DEL ARTE.....	19
3.	METODOLOGÍA.....	23
3.1	ELABORACIÓN DE DISEÑOS CAD.....	23
3.2	MATERIALES POR UTILIZAR EN LAS SIMULACIONES.....	28
3.3	CONDICIONES DE FRONTERA.....	28
3.4	VARIABLES POR EVALUAR.....	29
3.5	MALLADO.....	30
3.6	PROCESAMIENTO SIMULACIONES: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	30
3.7	ELABORACIÓN DE PLANOS Y PRESUPUESTO.....	31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	32
4.1.1	<i>Máxima tensión de Von Mises</i>	32
4.1.2	<i>Máximo desplazamiento</i>	34
4.1.3	<i>Factor de seguridad</i>	36
4.2	ANÁLISIS DE PUNTOS CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN Y MÍNIMO FACTOR DE SEGURIDAD PARA CADA DISEÑO CAD.....	38
4.2.1	<i>Tensión de Von Mises</i>	39

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.2	<i>Desplazamiento</i>	42
4.2.3	<i>Factor de seguridad</i>	45
4.3	SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA	48
4.4	CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA	49
4.5	RESULTADOS DE LA JAULA ANTIVUELCO EN LA COMPETENCIA.....	57
4.6	DISCUSIÓN	58
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	60
5.1	CONCLUSIONES.....	60
5.2	RECOMENDACIONES.....	61
5.3	TRABAJO FUTURO	61
	REFERENCIAS	62
	APÉNDICE.....	63
	APÉNDICE A. Plano de la jaula antivuelco.	63
	APÉNDICE B. Presupuesto de construcción del VTH.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Elipse para evaluar los resultados bajo el criterio de Von Mises.....	14
Figura 2.	Evaluación del criterio de falla: en rosado, la elipse para el criterio de Von Mises y en negro, el hexágono para el criterio de Tresca.....	14
Figura 3.	Varilla sometida a deformación: en a) varilla sin carga y en b) varilla con carga P.	16
Figura 4.	Vehículo de tracción humana (VTH).....	18
Figura 5.	Tipos de configuraciones: en A) tipo tadpole y en b) tipo delta.	18
Figura 6.	Chasis definido para el VTH: a) chasis real y b) chasis como diseño CAD.	23
Figura 7.	Diseño CAD 1: a) vista isométrica y b) vista lateral.	24
Figura 8.	Diseño CAD 2: a) vista isométrica y b) vista lateral.	24
Figura 9.	<i>Diseño CAD 3: a) vista isométrica y en vista lateral.</i>	25
Figura 10.	<i>Diseño CAD 1: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.</i>	26
Figura 11.	<i>Diseño CAD 2: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.</i>	27
Figura 12.	<i>Diseño CAD 3: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.</i>	27
Figura 13.	Ejemplo de cargas (en rojo), partes fijas (en azul) y gravedad (en amarillo) para el Diseño CAD 1.....	29

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 14. Diseño CAD 1: Mayor tensión de Von Mises.....	39
Figura 15. Diseño CAD 2: Mayor tensión de Von Mises.....	40
Figura 16. Diseño CAD 3: Mayor tensión de Von Mises.....	41
Figura 17. Diseño CAD 1: Mayor desplazamiento.....	42
Figura 18. Diseño CAD 2: Mayor desplazamiento.....	43
Figura 19. Diseño CAD 3: Mayor desplazamiento.....	44
Figura 20. Diseño CAD 1: Menor factor de seguridad.....	45
Figura 21. Diseño CAD 2: Menor factor de seguridad.....	46
Figura 22. Diseño CAD 3: Menor factor de seguridad.....	47
Figura 23. Primer ensamble del chasis.....	49
Figura 24. Construcción de la jaula antivuelco propuesta en el diseño CAD 1.....	50
Figura 25. Ensamble parcial de los componentes del VTH en el chasis con la jaula antivuelco del diseño CAD 1.....	51
Figura 26. Prueba de volcamiento a 180° vista isométrica.....	52
Figura 27. Prueba de volcamiento a 180° vista lateral.....	52
Figura 28. Jaula antivuelco terminada en un 77,7% siendo pintada.....	53
Figura 29. Jaula antivuelco terminada en un 88,8% vista isométrica.....	54
Figura 30. Jaula antivuelco terminada en un 88,8% vista lateral.....	54
Figura 31. Jaula antivuelco terminada.....	55
Figura 32. Equipo ITM y VTH terminado.....	56
Figura 33. Carta de agradecimiento por parte de la organización del evento.....	58
Figura 34. Geometrías propuestas para el trabajo de grado “Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011”.....	59
Figura 35. Resultados de las simulaciones para el trabajo de grado “Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011”.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	25
Tabla 2.....	25
Tabla 3.....	28
Tabla 4.....	33
Tabla 5.....	34
Tabla 6.....	36
Tabla 7.....	38

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Esfuerzo en un elemento.	12
Ecuación 2. Energía de distorsión	13
Ecuación 3. Condiciones de falla según el criterio de Von Mises	13
Ecuación 4. Deformación unitaria.	15
Ecuación 5. Deformación unitaria para un elemento o componente de área variable.....	16
Ecuación 6. Factor de seguridad en función de la carga	17
Ecuación 7. Factor de seguridad en función del esfuerzo.....	17

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Máxima tensión de Von Mises en función del número de elementos.....	32
Gráfica 2. Máximo desplazamiento en función del número de elementos.....	34
Gráfica 3. Mínimo factor de seguridad en función del número de elementos.....	36

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y la construcción de un componente que estará sometido a fuerzas, en este caso la jaula antivuelco que el reglamento del concurso exige para el VTH (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2018), implica la consideración de los esfuerzos y deformaciones que la misma pueda tener, ya que, es a partir de este análisis que se determina cuán segura es una estructura para un sistema (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010). Si estos componentes no son seguros, pueden existir fallas que ponen en riesgo el sistema mismo o el entorno en el que el sistema se encuentra. Por esta razón es pertinente realizar un análisis estructural a los sistemas de jaula antivuelco propuestas para garantizar la seguridad del sistema y la seguridad del entorno, en este caso, el tripulante, así como varios autores también lo hacen. (Aguirre Rojano & Pinedo Fuentes, 2017; Augusto, Camargo, Mario, & Sandoval, 2015; García Negrete & Peña Doria, 2017; Patiño Molina, 2011)

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018 exige dentro de su reglamento la implementación de una jaula antivuelco, para garantizar la seguridad del tripulante, por lo cual se hace necesario analizar el comportamiento estructural de la misma antes de realizar su construcción, para definir los parámetros de esta, de modo que cumpla con las exigencias del concurso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo general*

Analizar estructuralmente varios modelos de jaula antivuelco para un vehículo de tracción humana usando el método de elementos finitos con la finalidad de definir el modelo a construirse de modo que garantice el cumplimiento del reglamento de la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Realizar los modelos CAD del vehículo de tracción humana.
- Realizar el análisis de independencia de malla para cada uno de los modelos del vehículo de tracción humana.
- Realizar las simulaciones estructurales de cada uno de los modelos CAD con la finalidad de determinar cuál presenta el mejor comportamiento.
- Realizar los planos y presupuesto del modelo de jaula antivuelco seleccionada.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

En el capítulo 1, que corresponde a la introducción del trabajo se expone de manera detallada la pertinencia y la justificación de este, el planteamiento del problema y lo que se abordará, el objetivo general y específicos del trabajo y la organización en detalle de este.

En el capítulo 2, que corresponde al marco teórico se expone lo relacionado a los conceptos y teorías utilizadas para el desarrollo del trabajo. En este caso hablamos de lo referido a tener en cuenta en análisis y el diseño de una estructura (tensión de Von Mises, deformación y factor de seguridad). También se explica en breve lo que es un VTH, el por qué y el cómo se hace la simulación estructural y por último el estado del arte.

En el capítulo 3, que corresponde a la metodología, se expone el desarrollo sistemático de la simulación por medio de la cual se llegaron a los resultados. Además, se expone cómo fueron comparados los resultados que se exponen en el capítulo 4.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el capítulo 4, que corresponde a los resultados y las discusiones, se expone a lo que se llegó con las simulaciones realizadas, además de una comparación con otros autores acerca de los resultados de las simulaciones que ellos realizaron también.

En el capítulo 5, que corresponde a las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro, se expone lo referido a lo que se obtuvo en los resultados, hablando principalmente de las consecuencias de cada objetivo. Se expone también las recomendaciones, que, si se tenían en cuenta, mejorarían los resultados, además de qué es posible hacer para mejorar y proyectar a investigaciones más profundas el tema de esta investigación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES: ANÁLISIS Y DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA.

Tanto el análisis como el diseño de una estructura dada involucra la determinación de esfuerzos y deformaciones. La principal razón de la determinación de los esfuerzos es la seguridad, puesto que, sin un previo análisis de estos, no se puede determinar dónde pueda fallar o romperse una estructura. La determinación de la ruptura en una estructura no solo depende de la fuerza interna que actúa en la misma, sino de su sección transversal y del material con que se está elaborando. El material con que se elabora una estructura juega un papel fundamental ya que es en función de este que ocurren las rupturas, puesto que, es este el que soporta el valor correspondiente de las fuerzas distribuidas a través de la sección transversal de la misma (esfuerzo (σ), ver Ecuación 1) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 1. Esfuerzo en un elemento.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

Donde P representa la carga o fuerzas que actúan sobre la estructura y A representa la sección transversal de la misma. Debido al sistema SI, P se expresa en unidades de Newtons (N) y A en metros cuadrados (m^2), por lo tanto, el esfuerzo σ se expresa en N/m^2 . A esta unidad se le denomina *pascal* (Pa). Sin embargo, esta unidad tiende a muy pequeña, por lo cual se utilizan algunos prefijos para su expresión, tales como el kilopascal (kPa), el megapascal (MPa) o el gigapascal (GPa). (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Es por esto por lo que resulta importante analizar los esfuerzos y las deformaciones en una estructura. Para analizar los esfuerzos en una estructura se utiliza el criterio de Von Mises y para determinar cuán segura es la misma se utiliza el concepto de factor de seguridad (FS).

2.1.1 Tensión de Von Mises.

La tensión de Von Mises es un criterio de falla que se basa en el cálculo de la energía de distorsión en un material dado. Este criterio de falla analiza debido a las condiciones de esfuerzo a las que están sometidas el material, cuándo fallará, es decir, cuándo sobrepasa el límite elástico del mismo y el componente estructural se tornará inseguro. (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

La energía de distorsión por unidad de volumen en un material isotrópico bajo esfuerzo está dada por la fórmula (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010):

$$U_d = \frac{1}{6G} (\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2)$$

Ecuación 2. Energía de distorsión

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

Donde σ_a^2 y σ_b^2 son los esfuerzos principales y G el módulo de rigidez. En el caso en que se tienen condiciones bajo tensión, se tiene que $\sigma_a = \sigma_Y$ (donde σ_Y se conoce como el límite de elasticidad del material), $\sigma_b = 0$ y por lo tanto $(U_d)_Y = \sigma_Y^2 / 6G$. De esta manera se cumple que el criterio de Von Mises indica que el componente es seguro si (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010):

$$U_d < (U_d)_Y \quad \text{ó} \quad \sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b + \sigma_b^2 < \sigma_Y^2$$

Ecuación 3. Condiciones de falla según el criterio de Von Mises

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

Es decir, siempre que las coordenadas σ_a y σ_b caigan dentro del área mostrada de la elipse delimitada en rosado en la Figura 1 (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010).

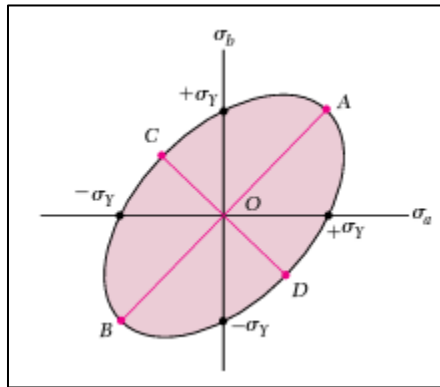


Figura 1. Elipse para evaluar los resultados bajo el criterio de Von Mises.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

Dentro del análisis de criterios de fallas también está el propuesto por el Ingeniero francés Henri Edouard Tresca (1814 – 1885), que a diferencia del propuesto por el matemático germano-estadounidense Richard Von Mises (1883 – 1953) este es menos preciso al tratarse de un hexágono para evaluar los resultados bajo el criterio de falla (ver Figura 2) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010).

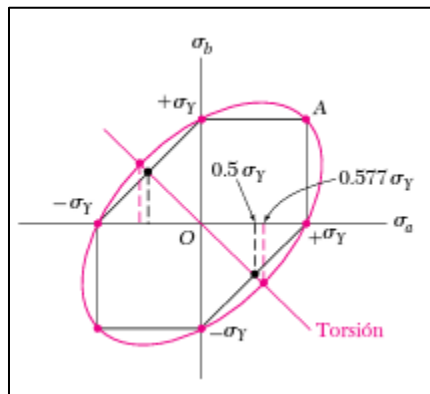


Figura 2. Evaluación del criterio de falla: en rosado, la elipse para el criterio de Von Mises y en negro, el hexágono para el criterio de Tresca.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

De la figura 2, el área delimitada por el hexágono está dentro de la Elipse, lo que indica que ambos sistemas están en concordancia, aunque sigue siendo el criterio de Von Mises más preciso que el criterio de Tresca, ya que, como se logra identificar en la figura,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

el criterio de Tresca no cubre algunas zonas que el criterio de Von Mises sí cubre (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010).

2.1.2 Deformación: desplazamiento.

Se define la deformación unitaria (ϵ) como la deformación (δ) por unidad de longitud (L) (ver Ecuación 4). Como la deformación y la longitud se expresan en las mismas unidades, la deformación normal obtenida de dividir δ entre L es una cantidad adimensional. Por lo tanto, se acostumbra a dar sus unidades como unidades de longitud sobre longitud dependiendo del sistema de unidades, por ejemplo: m/m, mm/mm, in/in, ft/ft, entre otros. (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Ecuación 4. Deformación unitaria.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

Tomemos como ejemplo el presentado en el libro de Mecánica de materiales de Beer F.P quinta edición (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010), en la página 48: Se tiene una varilla de longitud L (delimitada por las letras BC) y con un área uniforme de sección transversal A que está suspendida de B (ver Figura 3). Al aplicar una carga P al extremo de C, la varilla se alarga produciendo un desplazamiento. La deformación unitaria es hallada por medio de la Ecuación 4, ya que, se tiene una varilla con una sección transversal uniforme A y el esfuerzo (σ) tiene un valor constante P/A a lo largo de la misma.

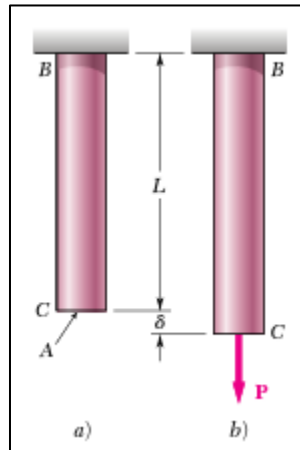


Figura 3. Varilla sometida a deformación: en a) varilla sin carga y en b) varilla con carga P.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

En el caso de un elemento de área variable de sección transversal A, el esfuerzo varía a lo largo del elemento, por lo tanto, es necesario definir la deformación unitaria en un punto dado Q considerando un pequeño elemento con longitud sin deformar Δx (ver Ecuación 5). (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

$$\epsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta x} = \frac{d\delta}{dx}$$

Ecuación 5. Deformación unitaria para un elemento o componente de área variable.

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

2.1.3 Factor de seguridad

Se define el factor de seguridad (FS) como la razón entre la carga última y la carga permisible (ver Ecuación 6) (también se define como la razón entre el esfuerzo último y el esfuerzo permisible si y solo si existe una relación lineal entre la carga y el esfuerzo, ver Ecuación 7). Se conoce por carga última, la carga a la que se espera que el elemento o componente falle (este dato es hallado en un ensayo de laboratorio) y por carga permisible, como la carga que soporta o estará sometido dicho elemento o componente en condiciones normales. (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\text{Factor de seguridad} = FS = \frac{\text{carga última}}{\text{carga permisible}}$$

Ecuación 6. Factor de seguridad en función de la carga

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

$$\text{Factor de seguridad} = FS = \frac{\text{esfuerzo último}}{\text{esfuerzo permisible}}$$

Ecuación 7. Factor de seguridad en función del esfuerzo

Nota. Tomado de Mecánica de materiales (5a. ed.) (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010)

La selección del factor de seguridad debe hacerse dependiendo de las aplicaciones del elemento o componente, teniendo en cuenta que, si el factor de seguridad se elige demasiado pequeño, la posibilidad de falla se hace enorme y si se elige demasiado grande, se convierte en un diseño caro o no funcional. (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010).

2.2 VEHÍCULOS DE TRACCIÓN HUMANA (VTH)

Un vehículo de tracción humana (VTH) es cualquier tipo de vehículo que es impulsado mediante el uso de la fuerza muscular. Estos VTH pueden variar según la función, uno de los VTH más conocidos es la bicicleta, sin embargo, hoy en día se desarrollan VTH tipo triciclos que, a diferencia de una bicicleta convencional, estos VTH poseen ventajas en cuando a la ergonomía y la estabilidad (ver Figura 4). Estos VTH tipo triciclos, pueden ser diseñados teniendo en cuenta dos configuraciones, la configuración delta que cuenta con dos llantas traseras y una delantera y la configuración tipo tadpole que cuenta con una llanta trasera y dos delanteras (ver Figura 5) . Esta última configuración es la más usada debido a que ofrece una mayor estabilidad. (Aguirre Rojano & Pinedo Fuentes, 2017)



Figura 4. Vehículo de tracción humana (VTH)

Nota. Tomado de Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH), enfocado a la movilidad sostenible y adaptable a las condiciones del terreno en el municipio de montería. (García Negrete & Peña Doria, 2017)



Figura 5. Tipos de configuraciones: en A) tipo tadpole y en b) tipo delta.

Nota. Tomado de Diseño y Construcción de Vehículo de Tracción Humana para la competencia UNIANDES 2011. (Patiño Molina, 2011)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 SIMULACIÓN ESTRUCTURAL

Cuando se desea diseñar y construir un producto que está sometido a una fuerza, en este caso un VTH, resulta muy importante hacer un análisis estructural para saber en qué puntos el vehículo podría tener fallas provocando deformaciones o rupturas en la estructura, por lo cual, varios autores han realizado el análisis estructural de sus vehículos. (Aguirre Rojano & Pinedo Fuentes, 2017; Augusto et al., 2015; García Negrete & Peña Doria, 2017; Patiño Molina, 2011)

Cada uno de los autores citados anteriormente, en sus tesis incluyen dentro de su metodología, el análisis estructural de sus VTH o componentes específicos de los mismos, por medio del uso del método de elementos finitos (FEM o FEA por sus siglas en inglés). Según Vásquez el método de elementos finitos “consiste en aproximaciones por funciones de prueba... el método de elementos finitos es una herramienta que nos permite realizar una gran cantidad de análisis en estructuras y componentes complejos, que difícilmente se obtienen por los métodos analíticos clásicos”. (Vásquez, 2012)

Así pues, cada uno de los autores mencionados en el primer párrafo utilizan este método de análisis en sus simulaciones para encontrar en general la tensión de Von Mises y los desplazamientos, algunos también encuentran el factor de seguridad que arrojan sus simulaciones. Dos de estos autores utilizan la herramienta de simulación que brinda Solid Works, otro utiliza la herramienta de simulación que brinda Autodesk INVENTOR y el último utiliza el simulador ANSYS 14.0.

2.4 ESTADO DEL ARTE

Los VTH son vehículos que cada vez más van cogiendo apogeo como un medio de transporte óptimo para reducir la contaminación, además de ser vehículos que estimulan los músculos de las extremidades inferiores. Estos vehículos también son utilizados para competencias en las cuales, las destrezas en el diseño y la construcción lo hacen competente. (García Negrete & Peña Doria, 2017)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el trabajo de grado titulado *“Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011”* (Patiño Molina, 2011), se expone de manera muy completa el diseño y la construcción de un VTH, abarcando todos los aspectos necesarios para la construcción. El autor, propone tres modelos de chasis para el vehículo, los cuales entran a ser discriminados mediante el uso de elementos finitos en el software de simulación ANSYS 14.0, situando una carga de 2000N sobre el punto más alto del chasis para entrar a analizar los esfuerzos y deformaciones máximas en cada uno. Es escogido el chasis que arroja mejores condiciones para esfuerzo y deformación, en este caso, el chasis C que presenta una deformación de 6,342mm (en comparación con el chasis A y B que presentan una deformación de 13,189mm y 13,413mm respectivamente) y un esfuerzo de 99,001MPa (el cual es relativamente bajo en comparación al esfuerzo máximo que presenta el material con el que se va a trabajar, en este caso aluminio con 280MPa) y en comparación con los chasis A y B, el chasis C tiene una menor masa (7862,68gr en comparación a 9128,68gr y 8920,99gr respectivamente).

En el 2015 se presenta un trabajo de grado titulado *“Dirección ‘tilting’ (por inclinación) trasera para Vehículo de Tracción Humana (VTH)”* (Augusto et al., 2015) en el cual se expone el diseño y la construcción de un sistema para la inclinación de dos llantas traseras. Este Sistema parte del mismo mecanismo propuesto en la patente *“Articulated balancer with an oscillating axle and having locking possibilities”* (Gore et al., 1998) con cambios en el diseño y la estructura, específicamente, adaptando y despreciando piezas debido al armazón del vehículo. En este trabajo, se realiza un análisis estructural mediante el uso del método de elementos finitos en el software de simulación INVENTOR para cada una de las piezas que forman parte del sistema tilting, aplicando una fuerza de 1177,2N equivalentes al peso del conjunto vehículo-piloto. En las simulaciones, el autor comprueba mediante el uso de elementos finitos que es mejor utilizar perfiles rectangulares en vez de perfiles circulares ya que, *“el esfuerzo de flexión varía linealmente con la distancia desde el eje neutro, por lo cual, se busca maximizar el segundo momento de área con el fin de minimizar el esfuerzo en flexión. De esta manera, los perfiles rectangulares representan ser una mejor opción”*

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

(Augusto et al., 2015), pues, el esfuerzo de flexión es inversamente proporcional al segundo momento de área (Tobergte & Curtis, 2013) y el segundo momento de área es mayor para los perfiles rectangulares reduciendo el esfuerzo de flexión (Augusto et al., 2015).

Por otra parte, en el año 2017, desde la Universidad de Córdoba se presentaron dos proyectos de grados en los que se expone el diseño y la construcción de un VTH, por un lado, un VTH capaz de navegar por las aguas del río Sinú y por caminos pavimentados y por el otro, un VTH capaz de transitar por zonas urbanas y rurales.

En el primer proyecto de grado presentado, titulado *“Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH) para desplazamiento sobre el río Sinú y rutas pavimentadas de la ciudad de montería”* (Aguirre Rojano & Pinedo Fuentes, 2017) se tiene en cuenta para la construcción, todos los parámetros necesarios como estabilidad y flotabilidad para el caso del casco, y, avance, inclinación, convergencia y compensación de Ackermann para el caso del chasis. El autor hace uso del software SolidWorks para hacer los diseños CAD para el chasis y el casco, luego, entra a analizar por medio del método de elementos finitos el esfuerzo realizado para cada parte (chasis y casco). Para el chasis, analiza el esfuerzo realizado por los materiales que componen el vehículo al hacer impacto con un resalto, para esto, se calcula la aceleración producida en el momento del impacto ($26,11\text{m/s}^2$) para así hallar las fuerzas equivalentes para el tren delantero y el tren trasero con la que se harán las simulaciones (2054N y 1341N respectivamente). Se encuentra que el esfuerzo realizado por los materiales del chasis no sobrepasa los límites elásticos del material por lo tanto el material es óptimo para la construcción. Para el casco, se hacen simulaciones para obtener la presión soportada a favor, en contra y transversalmente a la corriente. Con estos valores se obtienen las fuerzas a las cuales estará sometido el casco para cada caso (79N, 63N y 1117N respectivamente), se tiene que la fuerza de arrastre producida es de 62N y la carga (conjunto VTH-Usuario) es de 941N. Con estos valores, se procede a hacer el análisis mediante el método de elementos finitos y se obtiene que, para cada caso, las tensiones obtenidas no representan daños en el casco y/o el chasis.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En el segundo trabajo presentado, titulado *“Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH), enfocado a la movilidad sostenible y adaptable a las condiciones del terreno en el municipio de montería”* (García Negrete & Peña Doria, 2017) se analizan los parámetros para tener en cuenta en la construcción del VTH y se hace un análisis dinámico en donde se calculan los valores de carga a los que estará sometido el VTH. En este caso se encontró que, el VTH tendrá un peso de 1138N el cual se repartirá como cargas críticas en el tren delantero y el tren trasero (cargas de 667,8N y 470,22N respectivamente) que servirán para encontrar un factor K que determina el porcentaje de carga en el tren delantero. Por medio de las ecuaciones dinámicas y el factor K se calculan las fuerzas que influenciarán en el tren delantero y trasero debido al impacto con un resalto a una velocidad promedio de 20Km/h. Se obtiene que las fuerzas son de 2352N y 1656N respectivamente. Se hace un análisis estructural por medio del método de elementos finitos mediante el software de simulación SolidWorks para encontrar los puntos donde el VTH puede sufrir esfuerzos significativos debido a la influencia de las cargas en la sección frontal, la sección posterior, la sección lateral y la sección superior del VTH (cargas de 2352, 1656, 1330 y 2670N respectivamente). Por medio de las simulaciones, se determinan las tensiones que se generan para cada sección del VTH, con esto, se hizo una comparación con las tuberías comerciales para determinar cuál es la más óptima. Definida la tubería a utilizar, se hace una simulación final para la tubería principal, la tubería complementaria y las placas de la dirección del vehículo (con un esfuerzo de fluencia de 322, 322 y 250 MPa respectivamente para las tuberías comerciales a utilizar). En la simulación final se observa que los esfuerzos obtenidos para las tuberías (en dicho orden) fueron de 282,4; 229,2 y 188,3 respectivamente, valores que no representan daños en la estructura ya que, estos valores están por debajo de los valores nominales de la tubería.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

3.1 ELABORACIÓN DE DISEÑOS CAD

Con base a lo planeado para llevar a cabo un desarrollo sistemático de la metodología y cumplir con cada uno de los objetivos específicos planteados para llegar a resultados valederos, se empezó por hacer bocetos de jaulas antivuelco posibles sobre la base del chasis que ya se tenía definido para el VTH (ver Figura 6). Según el reglamento del concurso, para el diseño de cada jaula antivuelco se debía garantizar la seguridad del tripulante, de manera que, en caso de un volcamiento, el piloto no tenga contacto con el suelo y que la jaula antivuelco pueda soportar por lo menos 200kg (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2018)



Figura 6. Chasis definido para el VTH: a) chasis real y b) chasis como diseño CAD.

Nota. Elaboración propia.

Una vez definidos tres diseños para la jaula antivuelco del VTH, se procede a modelar cada boceto en una versión académica del programa de diseño asistido Solid Edge ST9. A continuación, se enseñarán los tres diseños CAD además de una tabla de masas y una tabla de volúmenes de estos, para los materiales considerados:

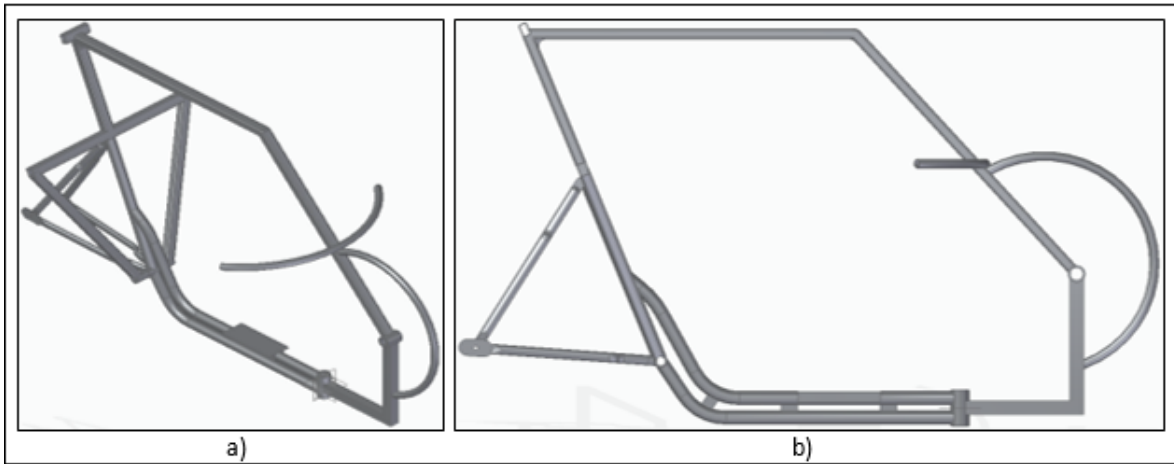


Figura 7. Diseño CAD 1: a) vista isométrica y b) vista lateral.

Nota. Elaboración propia.

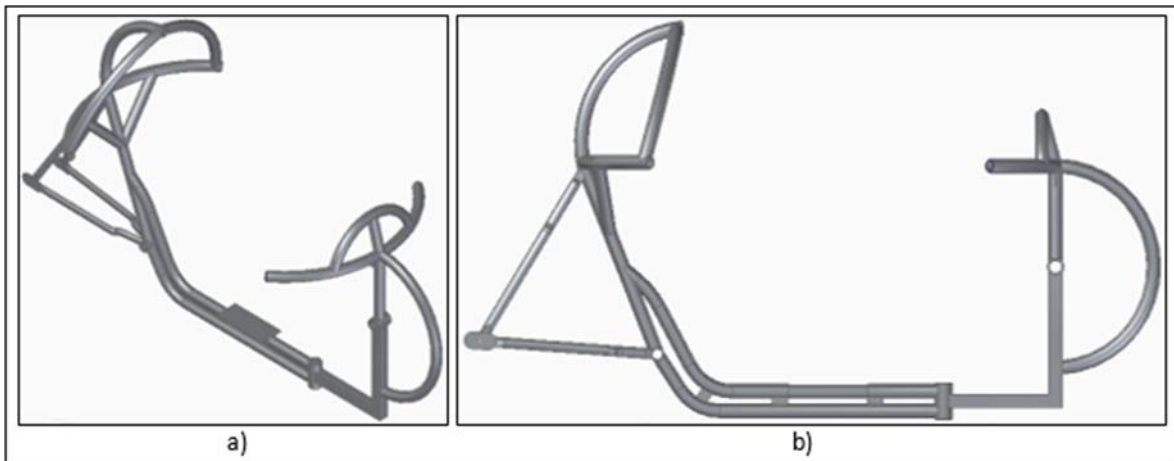


Figura 8. Diseño CAD 2: a) vista isométrica y b) vista lateral.

Nota. Elaboración propia.

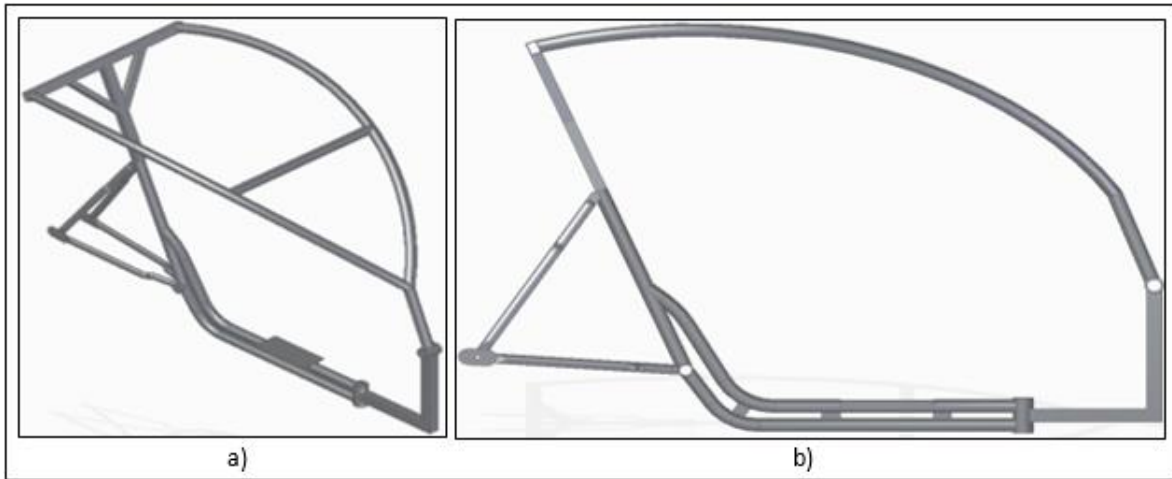


Figura 9. Diseño CAD 3: a) vista isométrica y en vista lateral.

Nota. Elaboración propia.

Tabla 1.

Masa total de cada uno de los Diseños CAD en función del material.

Material	Chasis	Chasis + Jaula 1	Chasis + Jaula 2	Chasis + Jaula 3
Acero	15.848	32.039	31.169	31.949
Acero Inoxidable	15.646	31.631	30.772	31.542
Aluminio	5.5922	11.305	10.999	11.274

Nota. Elaboración propia. Unidades en Kg.

Tabla 2

Volumen total de cada uno de los Diseños CAD.

	Volumen [m ³]
Chasis	2,0188E-03
Chasis + Jaula 1	4,0814E-03
Chasis + Jaula 2	3,9706E-03
Chasis + Jaula 3	4,0699E-03

Nota. Elaboración propia.

De la tabla 1, se evidencia que la jaula 2 en aluminio es la que menos masa tiene y la jaula 1 en acero es la que más masa presenta. También se puede evidenciar que las jaulas en aluminio son las que menos masa adquieren debido a la menor densidad del material. En cuanto al acero y acero inoxidable, los valores de estos se mantienen entre 30 y 32 kilogramos aproximadamente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

De la tabla 2, se evidencia que el volumen de las jaulas no varía considerablemente entre las mismas, estos valores se mantienen entre 3,9E-03 y 4,0E-03 m³.

Como se mencionó anteriormente, cada diseño CAD debía ser proyectado de manera que, en caso de un volcamiento, la jaula antivuelco garantice que el tripulante no tenga contacto con el suelo que pueda ocasionar lesiones graves. A continuación, se anexarán ilustraciones en las que se evidencia que cada jaula antivuelco cumple con este requisito:

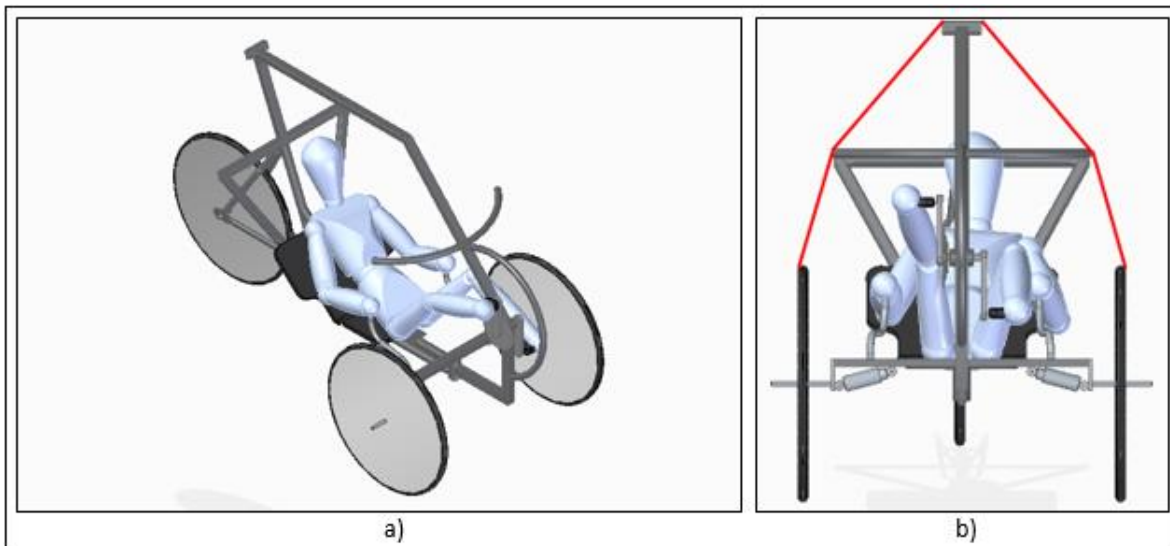


Figura 10. *Diseño CAD 1: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.*

Nota. *Elaboración propia.*

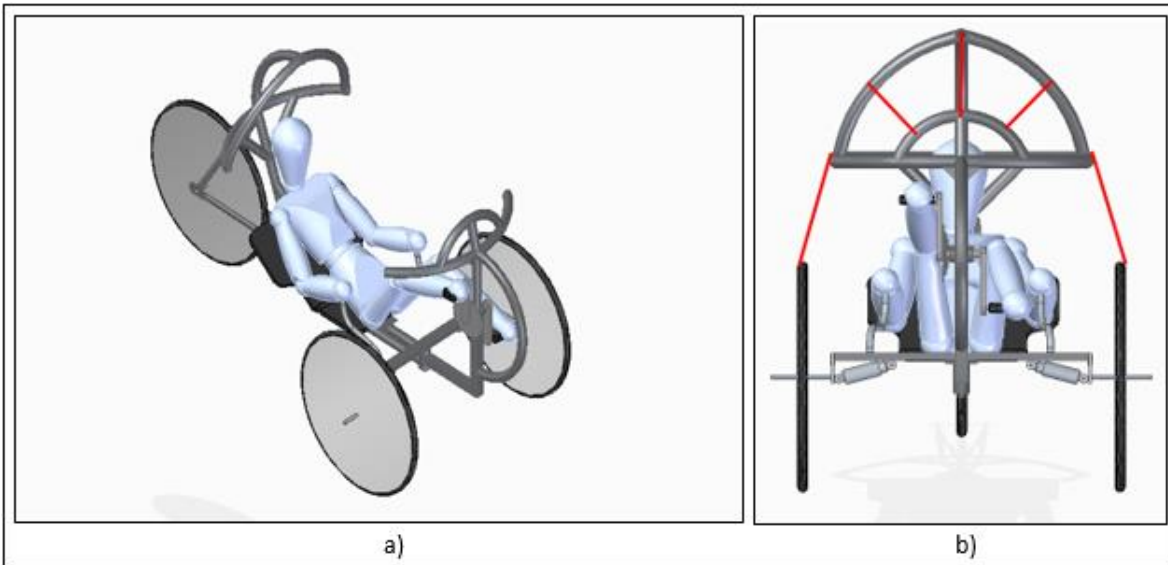


Figura 11. Diseño CAD 2: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.

Nota. Elaboración propia.

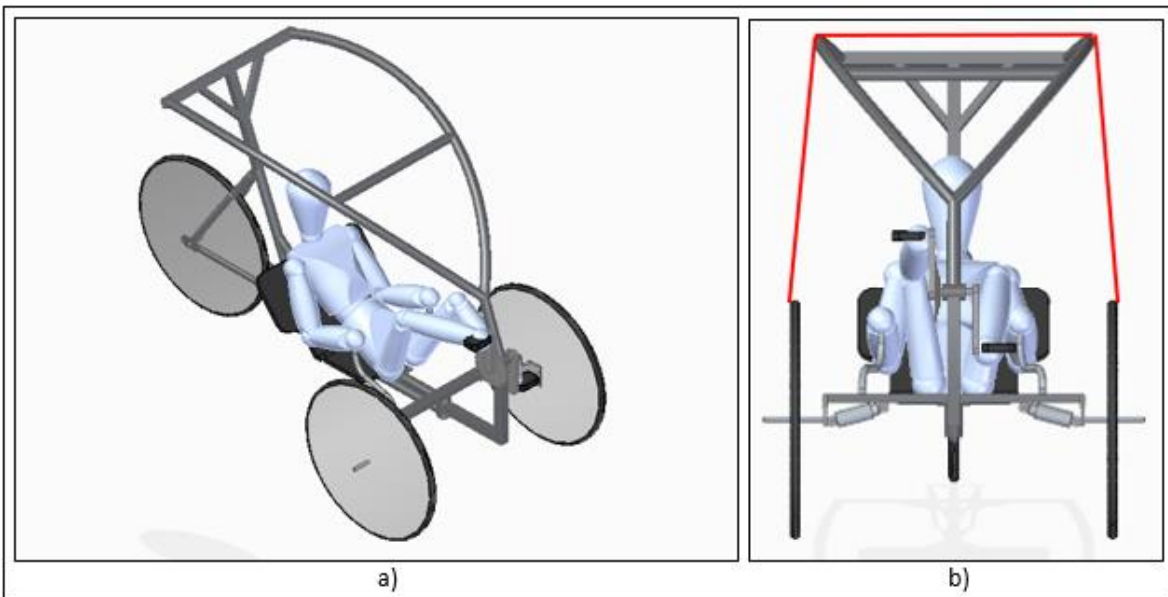


Figura 12. Diseño CAD 3: a) vista isométrica VTH – tripulante y b) planos tangentes que evidencian la seguridad al tripulante.

Nota. Elaboración propia.

Para el ensamble mostrado en las figuras anteriores, se utilizó un muñeco de prueba que tenía una altura de 1.86m, equivalentes a la altura del integrante más alto del equipo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En las figuras se dibujaron unas líneas rojas que representan planos tangentes formados por puntos de apoyo entre las llantas y la jaula antivuelco misma. Estos planos son similares a los planos formados por el piso cuando el vehículo es volcado 360° parcialmente. Cada uno de los planos evidencia que el tripulante no sufrirá contactos graves con el piso en caso de un volcamiento (volcamiento con cinturón de seguridad puesto), en conclusión, cada geometría está garantizando el triángulo de vida al tripulante.

3.2 MATERIALES POR UTILIZAR EN LAS SIMULACIONES

Una vez se tienen definidos y garantizados los diseños CAD, estos son importados a la plataforma de simulación ANSYS 19, para luego ser simulados bajo las cargas a soportar. Para la simulación de los diseños CAD bajo las condiciones de frontera, se utilizaron tres materiales, acero, acero inoxidable y aluminio (ver Tabla 3) con el fin de determinar cuál material – geometría presenta los mejores comportamientos.

Tabla 3

Propiedades de los materiales a evaluar. Tomados de la plataforma Workbench (ANSYS).

	Densidad [Kg m ³]	Resistencia a la tracción [MPa]	Resistencia a la compresión [MPa]	Resistencia a la tracción última [MPa]
Acero	7850	250	250	460
Acero Inoxidable	7750	207	207	586
Aluminio	2770	280	280	310

Nota. Elaboración propia.

3.3 CONDICIONES DE FRONTERA

Para la simulación de los diseños CAD, se aplicaron dos cargas sobre el vehículo. La primera corresponde a la carga adicionada, es decir, la carga correspondiente a los 200Kg que se pondrá sobre la jaula antivuelco del VTH para determinar si la misma sufre o no deformaciones plásticas (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2018). Esta carga corresponderá a 1962N (equivalente a la multiplicación de la masa adicionada y la gravedad). La segunda carga corresponde al peso del tripulante, en este caso se tomará la cantidad de masa correspondiente al integrante más pesado del equipo, en definición, una

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

masa de 150Kg. Esta corresponde a 1471,5N (equivalente a la multiplicación de la masa del tripulante y la gravedad). Como partes fijas dentro de la simulación, se dispuso de 3 soportes cilíndricos, dos de ellos correspondientes a los agujeros del eje de la llanta trasera y el otro correspondiente al eje de la barra de dirección Además de las cargas adicionales y las partes fijas del VTH, se agregó la gravedad (ver Figura 13).

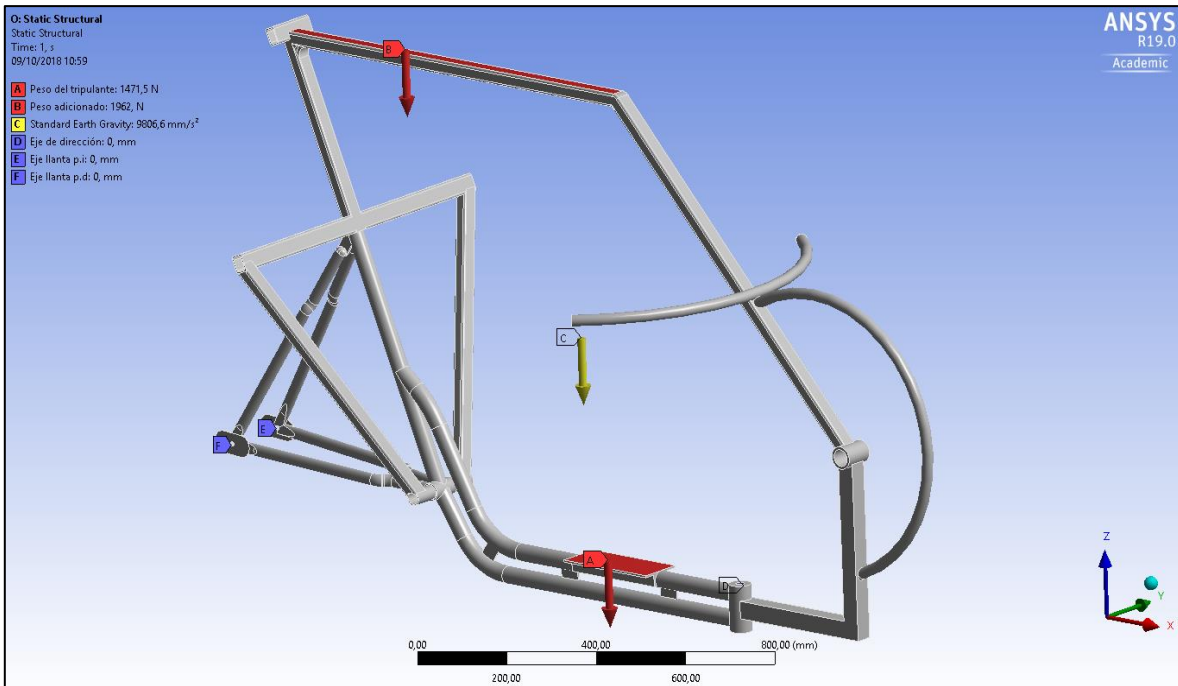


Figura 13. Ejemplo de cargas (en rojo), partes fijas (en azul) y gravedad (en amarillo) para el Diseño CAD 1.

Nota. Elaboración propia.

3.4 VARIABLES POR EVALUAR

Una vez posicionadas todas las cargas, las partes fijas y la gravedad a cada diseño CAD, se añadió al panel de control las variables que se desean evaluar, en este caso, la máxima tensión de Von Mises, el máximo desplazamiento alcanzado y el mínimo factor de seguridad, ya que es por medio de estas variables que evaluaremos los puntos donde alguna estructura pueda tener fallas y por consiguiente analizaremos también, si la estructura que se evaluó ofrece realmente o no condiciones de seguridad tanto para la estructura misma y el piloto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.5 MALLADO

Una vez importados los diseños CAD en la plataforma de ANSYS 19, se importó de la librería de materiales de Workbench los materiales a evaluar (en este caso Acero, Acero Inoxidable y Aluminio), se establecieron las cargas y partes fijas definidas en la sección 3.3 y se colocó en el panel de control las variables a evaluar definidas en la sección 3.4. Se procede a realizar las simulaciones para cada diseño CAD bajo cada material.

Para determinar la independencia de malla, se varió el tamaño del elemento finito del mallado entre un intervalo de 100mm a 2mm, reduciendo la malla en 10mm para el intervalo 100mm – 10mm y en 2mm para el intervalo 10mm – 2mm. De esta manera, se analizará en qué punto los resultados son inferiores al 5% con respecto al resultado anterior, y es allí donde se dirá que, se logró la independencia de malla. Los resultados obtenidos serán compilados y graficados.

3.6 PROCESAMIENTO SIMULACIONES: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS.

Una vez terminados y compilados los datos arrojados en las simulaciones que se expondrán en la sección 4, se proceden a discriminar las geometrías. La discriminación de las geometrías se hace por medio del límite de elasticidad para el caso de los resultados arrojados en tensión de Von Mises, donde, para la geometría – material que sobrepase el límite de elasticidad, será descartada inmediatamente, pues, según el criterio de Von Mises, si los esfuerzos son mayores al límite de elasticidad esto quiere decir que los resultados de esfuerzo están por fuera de la elipse que utilizamos para evaluar los mismos (ver Figura 1), por lo tanto esa geometría es insegura. Para el caso del desplazamiento, se estimará un desplazamiento máximo aceptado por nosotros los diseñadores el cuál se definirá en función del promedio de resultados. Para el factor de seguridad, se establecerá un valor que también será estimado por nosotros los diseñadores teniendo en cuenta las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

recomendaciones del libro de Mecánica de Materiales de Beer expuestas en la sección 2.1.3.

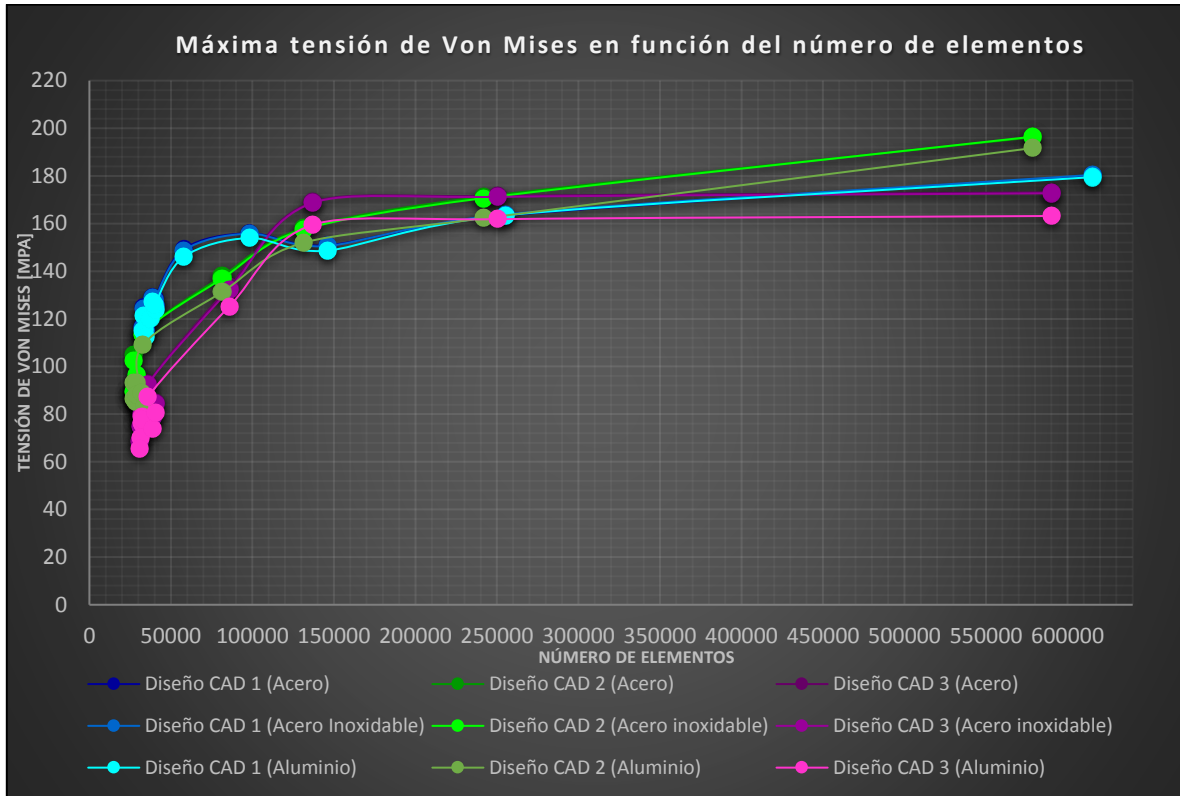
3.7 ELABORACIÓN DE PLANOS Y PRESUPUESTO

Una vez se discriminan todas las geometrías se selecciona la geometría que ofrece las mejores condiciones y se elaboran los planos respectivos para la construcción de este. En cuanto al presupuesto de construcción, estos son elaborados con base a las facturas de compra de los componentes y tuberías para la jaula antivuelco. La construcción de esta se hace por cuenta de los integrantes del semillero de investigación, por lo tanto, la mano de obra no es incluida en esta. La presentación de ambos componentes es realizada de forma detallada en los Apéndices A y B respectivamente, sin embargo, en el siguiente capítulo son discutidas algunas características de los estos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

4.1.1 Máxima tensión de Von Mises



Gráfica 1. Máxima tensión de Von Mises en función del número de elementos.

Nota. Elaboración propia.

NOTA: Debido a la exigencia computacional para llegar a un porcentaje de error inferior al 5% en los resultados de cada material, algunas curvas en las gráficas no alcanzan la estabilidad a medida que aumenta el número de elementos.

En la Gráfica 1 se muestra la máxima tensión de Von Mises en función del número de elementos para cada diseño CAD y con cada uno de los tres materiales elegidos para las pruebas de simulación. El propósito de esta gráfica es analizar cuáles geometrías - materiales ofrecen las mejores condiciones de tensión con respecto al límite de elasticidad

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de cada material (ver Tabla 4). En azul, se representan los resultados del diseño CAD 1; en verde, se representan los resultados del diseño CAD 2; en púrpura, se presentan los resultados del diseño CAD 3.

De los datos suministrados por el programa de diseño Workbench, los límites elásticos para cada uno de los materiales son:

Tabla 4

Límites de elasticidad

Resistencia máxima a la tracción	
Acero	460MPa
Acero Inoxidable	586MPa
Aluminio	310MPa

Nota. Elaboración propia.

Por medio de la Tabla 4 y los puntos que alcanzaron la máxima tensión de Von Mises que se muestran en la Gráfica 1, es posible concluir que todas las geometrías y todos los materiales cumplen con el objetivo de resistir la carga adicionada sin sufrir deformaciones plásticas, pues, si se comparan estos valores máximos obtenidos de las simulaciones con los límites de elasticidad de cada material, nos daremos cuenta que estos valores máximos están por debajo del límite de elasticidad, lo que indica que, al adicionar la carga a la jaula antivuelco, está sufriendo una deformación que será recuperada espontáneamente por el material hasta llegar a su forma original al momento de ser retirada la carga.

En resumen:

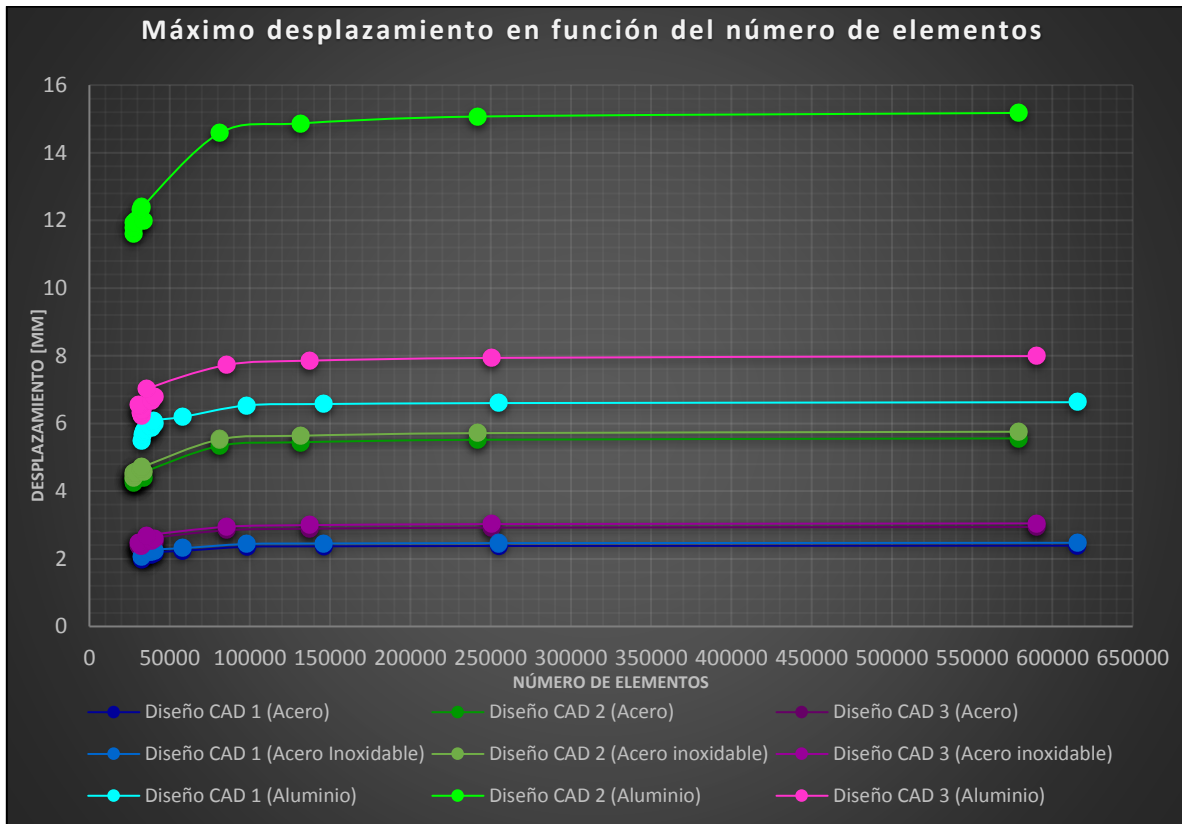
Tabla 5

Análisis y resultados de las simulaciones

Diseño CAD	Material	Tensión máxima [Mpa]	Límite elástico [Mpa] (Tabla 4)	% por encima del límite (-) % por debajo del límite (+)	¿Es apto el Diseño CAD bajo el material?
1	Acero	180,12	460	61%	✓
	Acero Inoxidable	180,44	586	69%	✓
	Aluminio	179,49	310	42%	✓
2	Acero	196,19	460	57%	✓
	Acero Inoxidable	196,48	586	66%	✓
	Aluminio	191,69	310	38%	✓
3	Acero	173,09	460	62%	✓
	Acero Inoxidable	172,68	586	71%	✓
	Aluminio	163,18	310	47%	✓

Nota. Elaboración propia

4.1.2 Máximo desplazamiento



Gráfica 2. Máximo desplazamiento en función del número de elementos.

Nota. Elaboración propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Gráfica 2 se muestra el máximo desplazamiento en función del número de elementos para cada diseño CAD. En esta gráfica es posible observar cómo los resultados se hicieron estables a medida que se aumentó el número de elementos en la malla, logrando un error inferior al 5% con respecto al dato anterior. En azul, se representan los resultados del diseño CAD 1; en verde, se representan los resultados del diseño CAD 2; en púrpura, se presentan los resultados del diseño CAD 3.

De la gráfica, se puede determinar que el aluminio es el material que produce mayor desplazamiento en cada uno de los diseños CAD en semejanza con los demás materiales: 15.177mm para el diseño CAD 2, 7.9909mm para el diseño CAD 3 y 6.6271mm para el diseño CAD 1. El material que produce el menor desplazamiento en semejanza con los demás materiales es el acero, con 5.5575mm para el diseño CAD 2, 2.9398 para el diseño CAD 3 y 2.3876mm para el diseño CAD 1. En cuanto al acero inoxidable, este material también ofrece desplazamientos muy bajos en comparación con el aluminio y muy próximos a los desplazamientos ofrecidos por el acero, aunque sigue siendo el acero el que ofrece los desplazamientos más bajos; los valores arrojados para el acero inoxidable son: 5.7547mm para el diseño CAD 2, 3.0461mm para el diseño CAD 3 y 2.4722mm para el Diseño CAD 1.

Para entrar a discriminar cuáles geometrías – materiales ofrecen el mejor comportamiento para el desplazamiento, se determinó un límite máximo aceptable para la deformación de 3mm, por lo tanto, las geometrías con desplazamientos inferiores a 3mm serán las más óptimas.

En resumen:

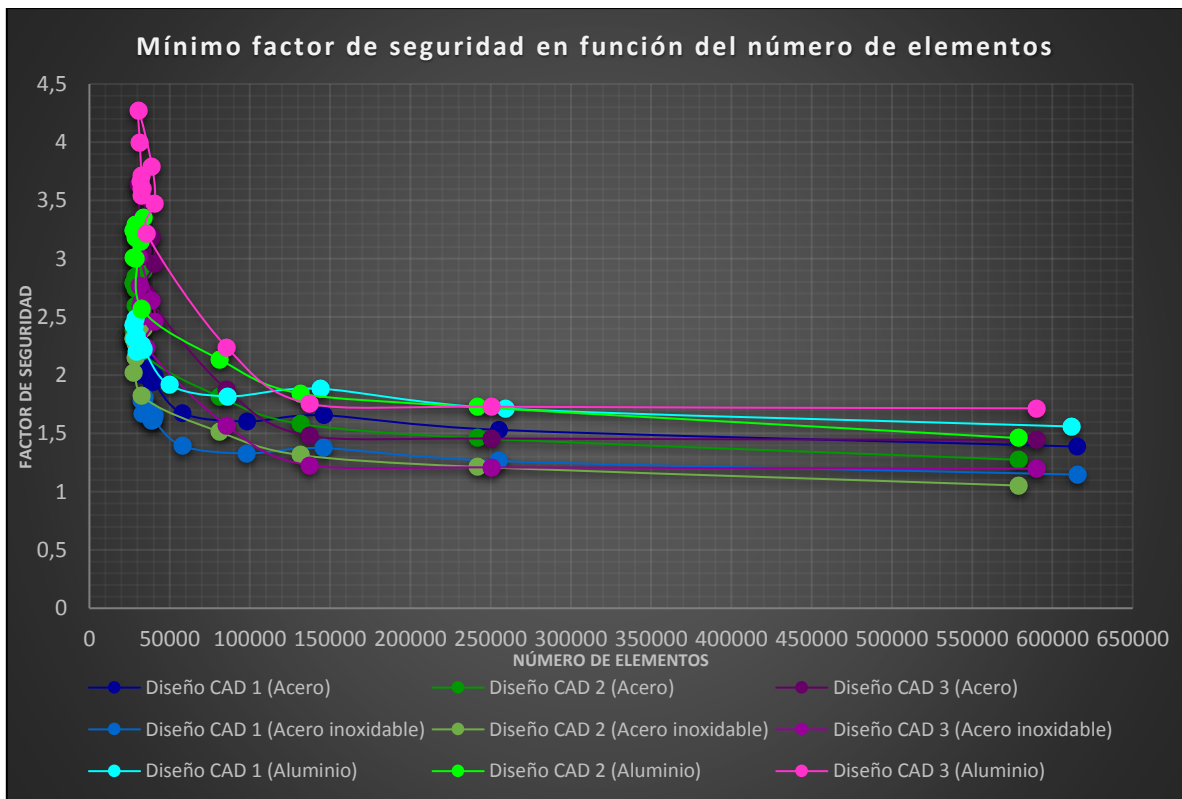
Tabla 6

Análisis y resultados de las simulaciones de desplazamiento.

Diseño CAD	Material	Desplazamiento máximo [mm]	Límite máximo aceptable [mm]	% por encima del límite (-) % por debajo del límite (+)	¿Es apto el Diseño CAD bajo el material?
1	Acero	2,3876	3	20%	✓
	Acero Inoxidable	2,4722	3	18%	✓
	Aluminio	6,6271	3	-121%	✗
2	Acero	5,5575	3	-85%	✗
	Acero Inoxidable	5,7547	3	-92%	✗
	Aluminio	15,177	3	-406%	✗
3	Acero	2,9398	3	2%	✓
	Acero Inoxidable	3,0461	3	-2%	✗
	Aluminio	7,9909	3	-166%	✗

Nota. Elaboración propia.

4.1.3 Factor de seguridad



Gráfica 3. Mínimo factor de seguridad en función del número de elementos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

NOTA: Debido a la exigencia computacional para llegar a un porcentaje de error inferior al 5% en los resultados de cada material, algunas curvas en las gráficas no alcanzan la estabilidad a medida que aumenta el número de elementos.

En la Gráfica 3 se muestra el mínimo valor para el factor de seguridad arrojado en las simulaciones. Este factor, es un número adimensional y para que este sea efectivamente seguro debe estar por encima de 1.

De la gráfica, se puede observar que el aluminio es el que mejor factor de seguridad brinda para cada uno de los tres diseños con 1,7159 para el diseño CAD 3, 1,5599 para el diseño CAD 1 y 1,4607 para el diseño CAD 2; el acero sería el segundo que brinda el mejor factor de seguridad con 1,443 para el diseño CAD 3, 1,388 para el diseño CAD 1 y 1,2743 para el diseño CAD 2; y por último está el acero inoxidable con 1,1988 para el diseño CAD 3, 1,1472 para el diseño CAD 1 y 1,0535 para el diseño CAD 2.

Para entrar a discriminar cuáles geometrías – materiales ofrecen el mejor comportamiento para el factor de seguridad, se determinó un límite mínimo aceptable de 1.2. Si bien, cualquier geometría que arroje un resultado por encima de 1 garantiza seguridad, para nosotros es importante dimensionar un poco más arriba este límite, ya que, si se discriminan las geometrías con un límite de 1, cualquier carga superior a las establecidas para el análisis podría ocasionar graves fallas en la estructura (Beer, Johnston, & DeWolf, 2010). Sin embargo, cabe aclarar que debido a que para las simulaciones efectuadas las condiciones de carga son superiores a las exigidas por la competencia, este factor de seguridad será mayor pues en la competencia no estarán simultáneamente el peso del integrante y los 200kg de carga.

En resumen:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 7

Análisis y resultados de las simulaciones de factor de seguridad.

Diseño CAD	Material	Factor de seguridad	Límite mínimo aceptable	% por debajo del límite (-) % por encima del límite (+)	¿Es apto el Diseño CAD bajo el material?
1	Acero	1,388	1,2	16%	✔
	Acero Inoxidable	1,1472	1,2	-4%	✘
	Aluminio	1,5599	1,2	30%	✔
2	Acero	1,2743	1,2	6%	✔
	Acero Inoxidable	1,0535	1,2	-12%	✘
	Aluminio	1,4607	1,2	22%	✔
3	Acero	1,4443	1,2	20%	✔
	Acero Inoxidable	1,1988	1,2	0%	✘
	Aluminio	1,7159	1,2	43%	✔

Nota. Elaboración propia.

4.2 ANÁLISIS DE PUNTOS CON MAYOR ESFUERZO Y DEFORMACIÓN Y MÍNIMO FACTOR DE SEGURIDAD PARA CADA DISEÑO CAD.

A continuación, se anexarán figuras para cada geometría donde se muestran los puntos en los cuales se concentran el mayor esfuerzo, deformación y mínimo factor de seguridad. Estas ilustraciones muestran los resultados de las simulaciones con un tamaño de elemento de 10mm para el mallado, ya que es allí donde todas las geometrías alcanzan su independencia de malla. Los puntos de mayor tensión, mayor deformación y menor factor de seguridad allí mostrados son iguales para cada material.

4.2.1 Tensión de Von Mises

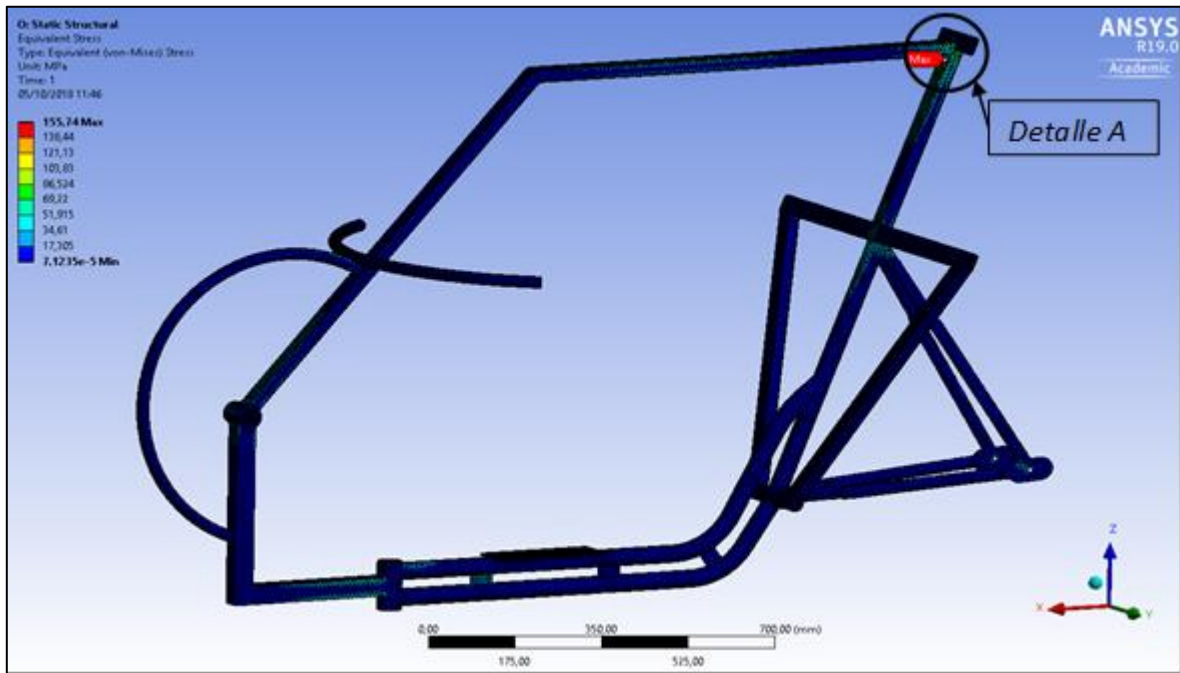
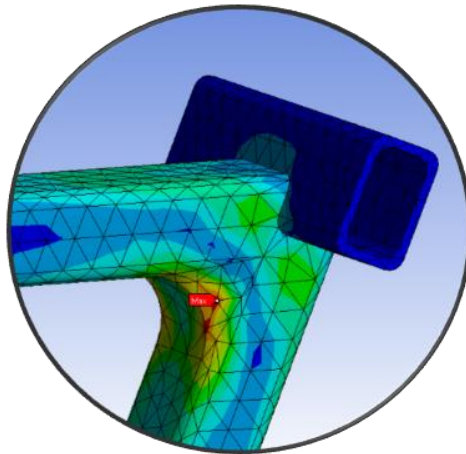


Figura 14. Diseño CAD 1: Mayor tensión de Von Mises.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle A - Figura 14. Punto con mayor tensión.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

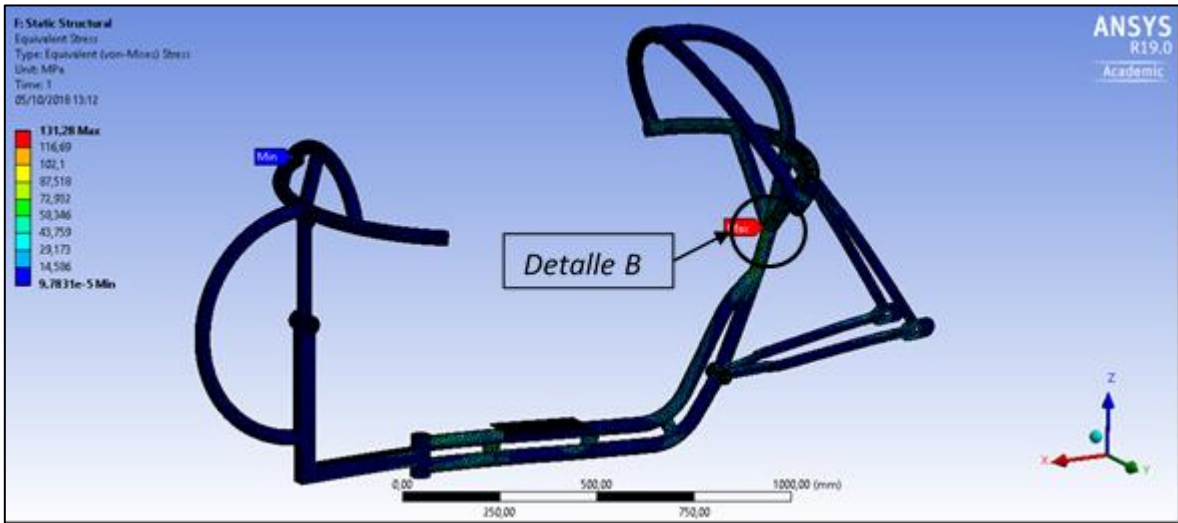
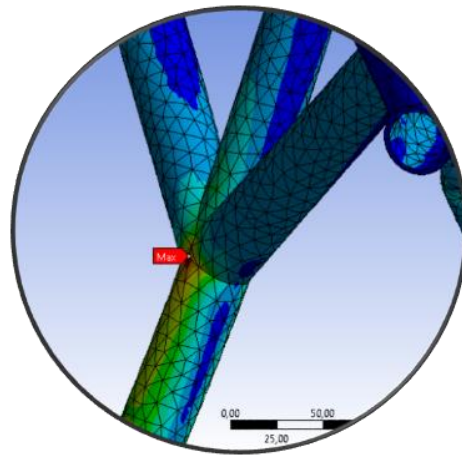


Figura 15. Diseño CAD 2: Mayor tensión de Von Mises.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle B- Figura 15. Punto con mayor tensión.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

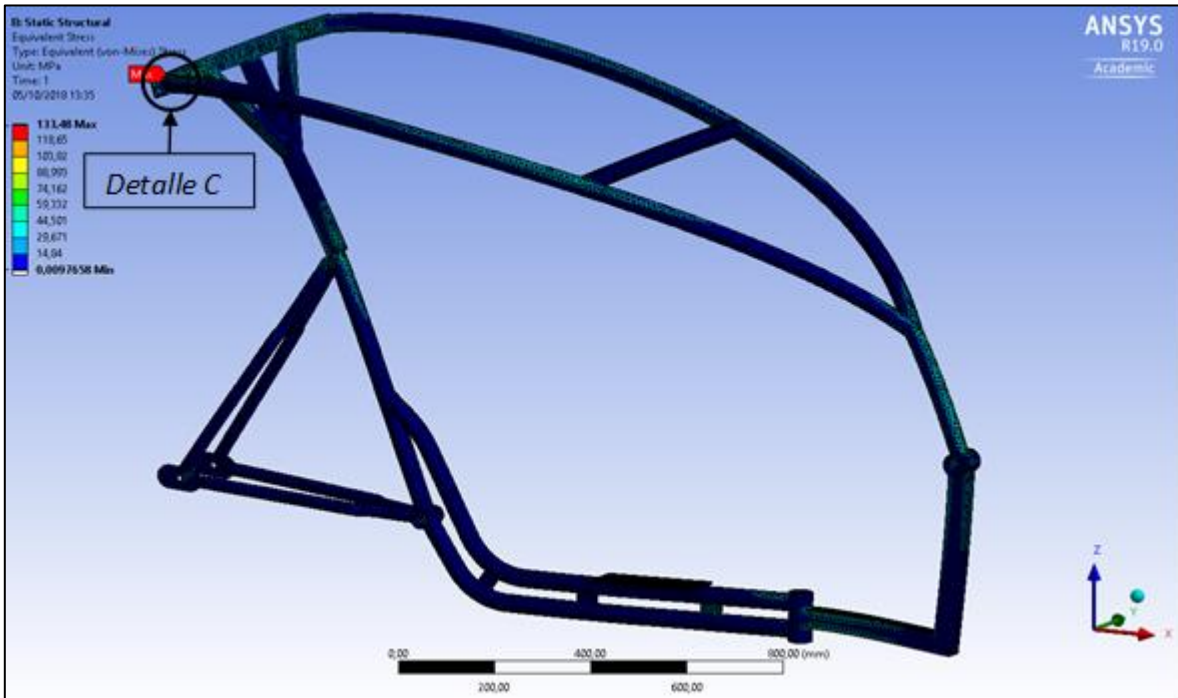
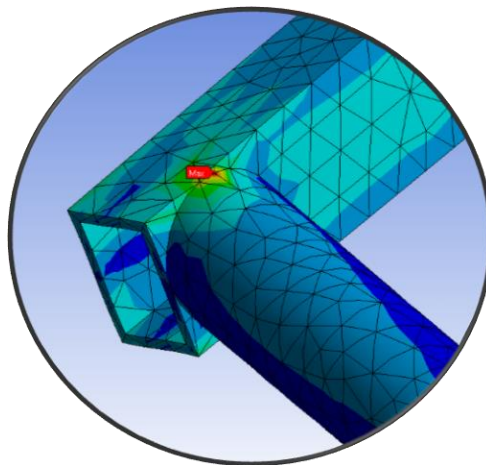


Figura 16. Diseño CAD 3: Mayor tensión de Von Mises.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle C - Figura 16. Punto con mayor tensión.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

De la Figura 14 a la Figura 16, se muestran los puntos donde se concentran los mayores esfuerzos o tensiones. En común, para las tres geometrías, estos concentradores de esfuerzo están ubicados en las partes donde se unen o se cambia de tubería. Esto es debido

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a que, los concentradores de esfuerzo se alojan en los puntos donde se generan cambios bruscos en la geometría, como se evidencia en dichas ilustraciones.

4.2.2 Desplazamiento

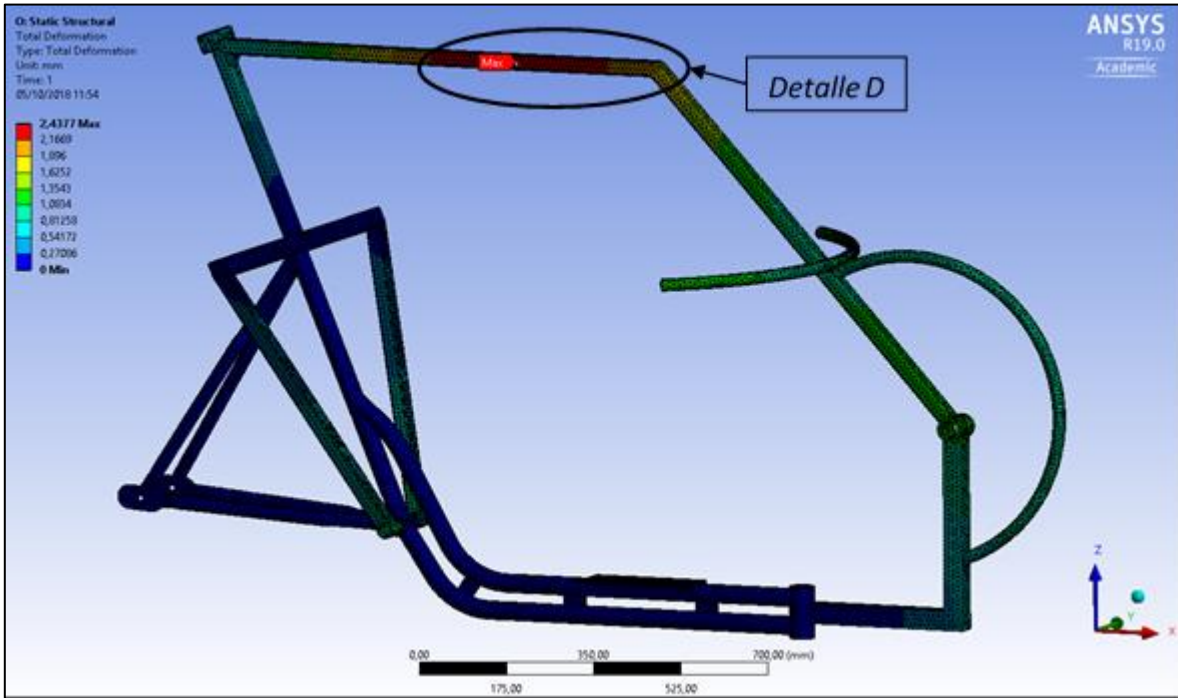
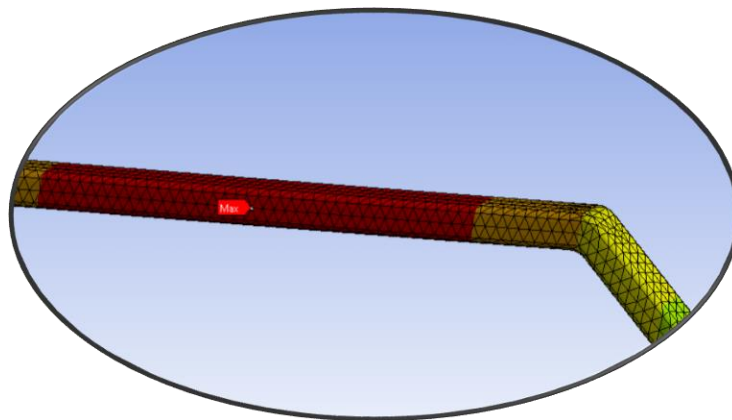


Figura 17. Diseño CAD 1: Mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle D - Figura 17. Punto con mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

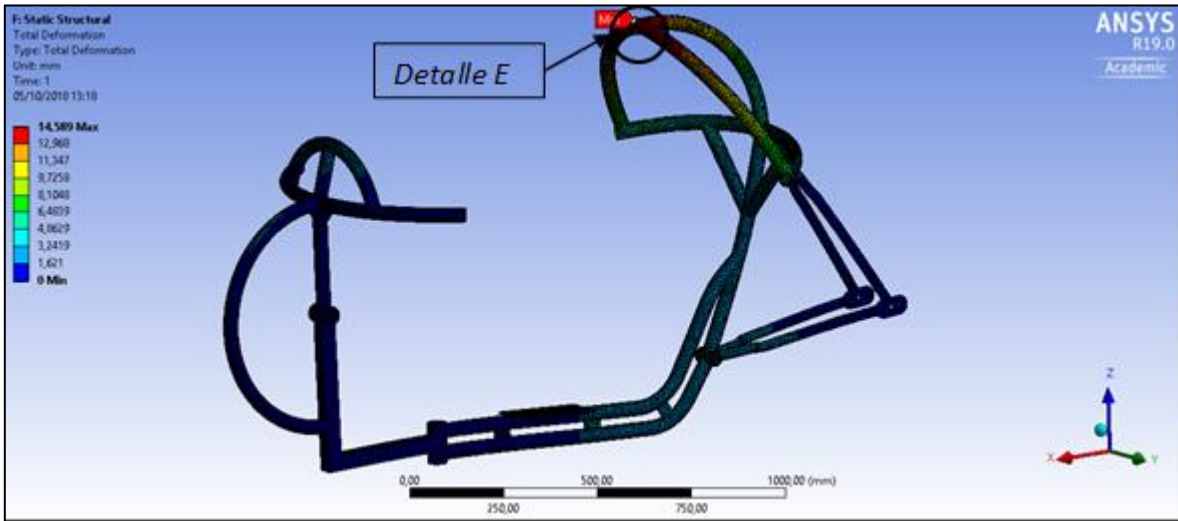
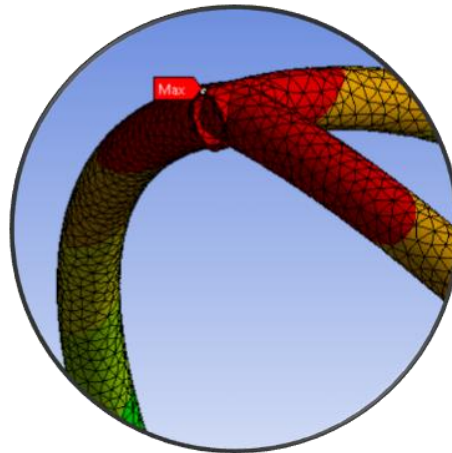


Figura 18. Diseño CAD 2: Mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle E - Figura 18. Punto con mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

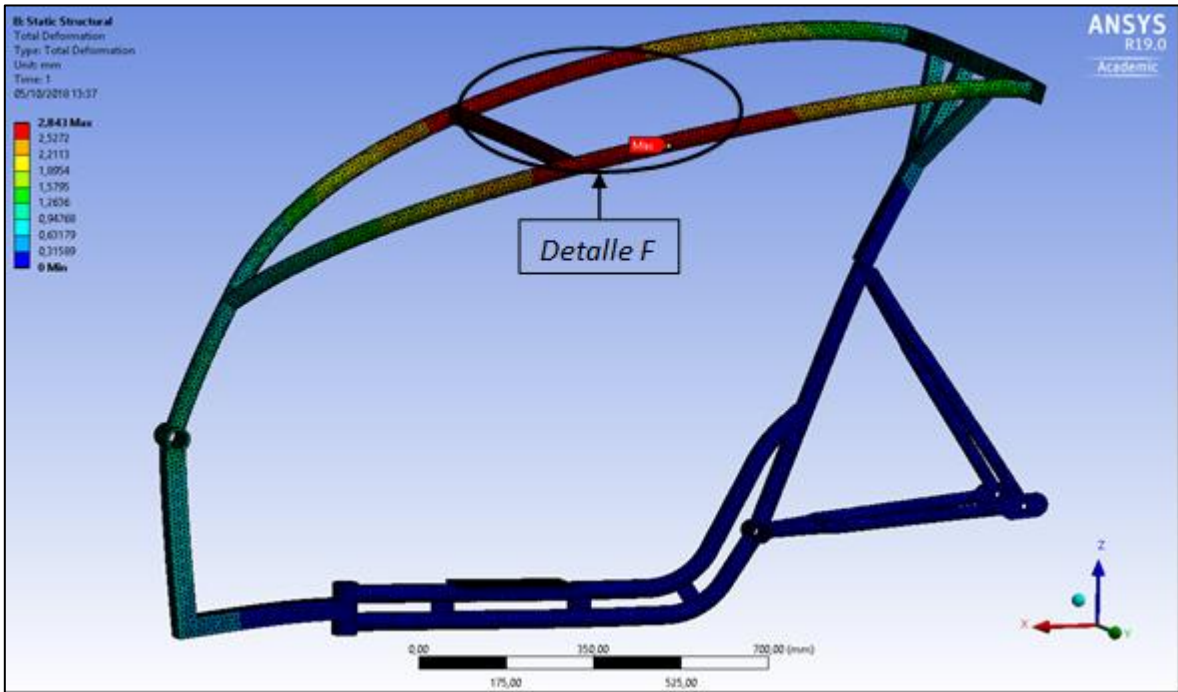
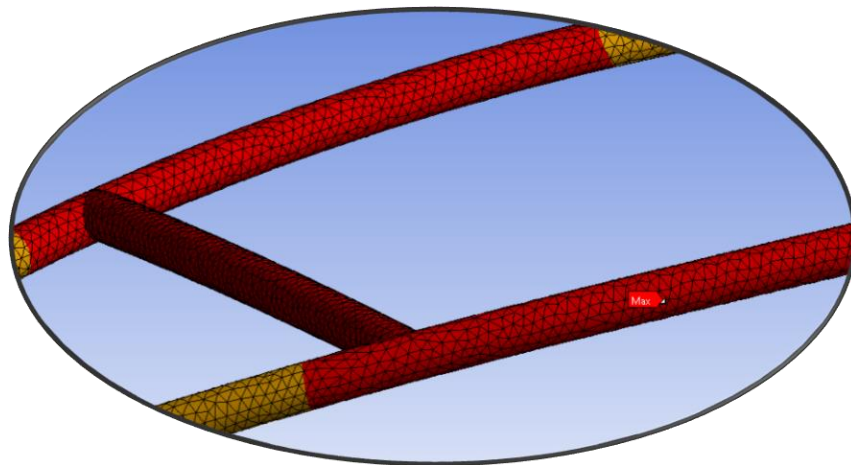


Figura 19. Diseño CAD 3: Mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle F - Figura 19. Punto con mayor desplazamiento.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

De la Figura 17 a la Figura 19, se muestran los puntos donde se generaron los mayores desplazamientos para cada diseño CAD. Estos desplazamientos, que se generan en el eje vertical, se deben primordialmente a que son estos puntos donde se presenta el mayor

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

espacio sin apoyos. Colocar apoyos en esos espacios donde se presentan estos desplazamientos conllevaría a adicionar más peso al vehículo y alterar tal vez ciertos resultados, por lo tanto, y debido a que son desplazamientos tratables, no se entran a modificar estas geometrías.

4.2.3 Factor de seguridad

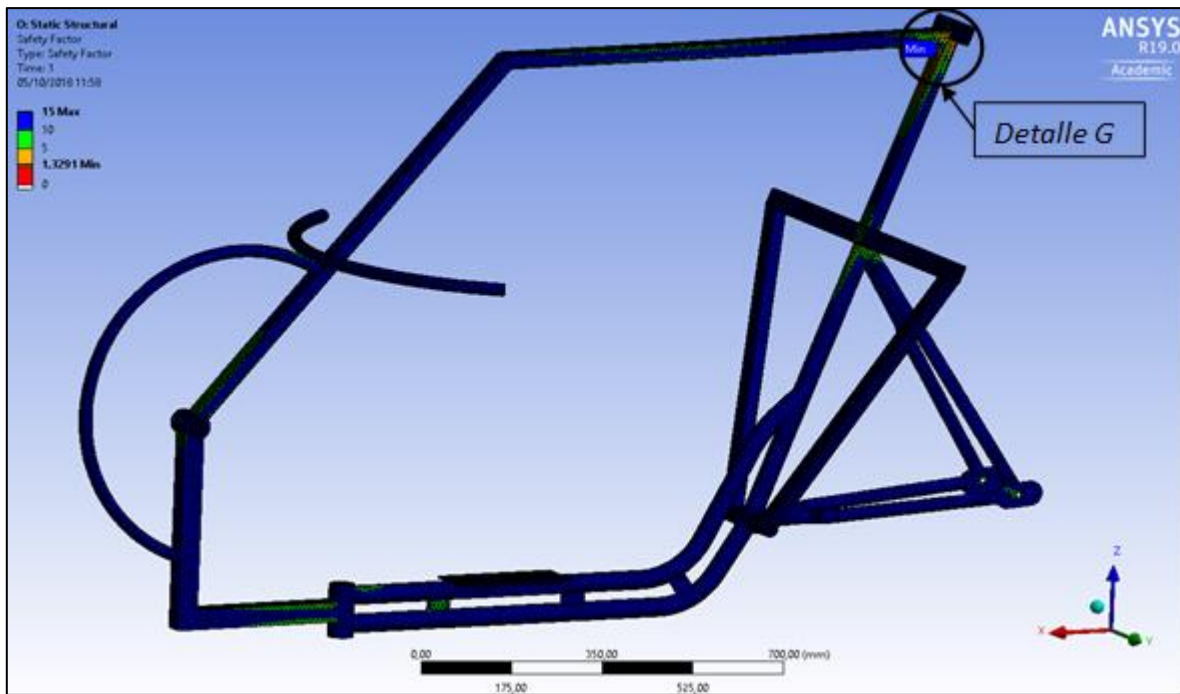
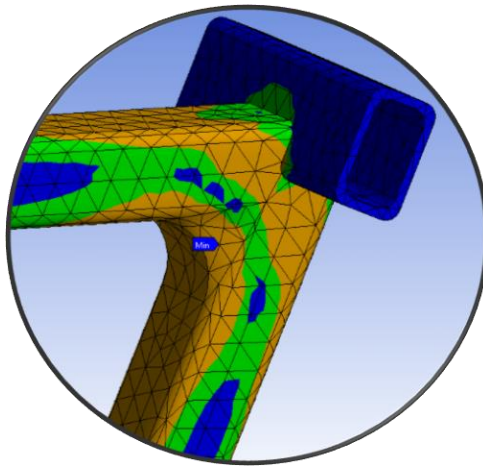


Figura 20. Diseño CAD 1: Menor factor de seguridad.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle G - Figura 20. Punto con menor factor de seguridad.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

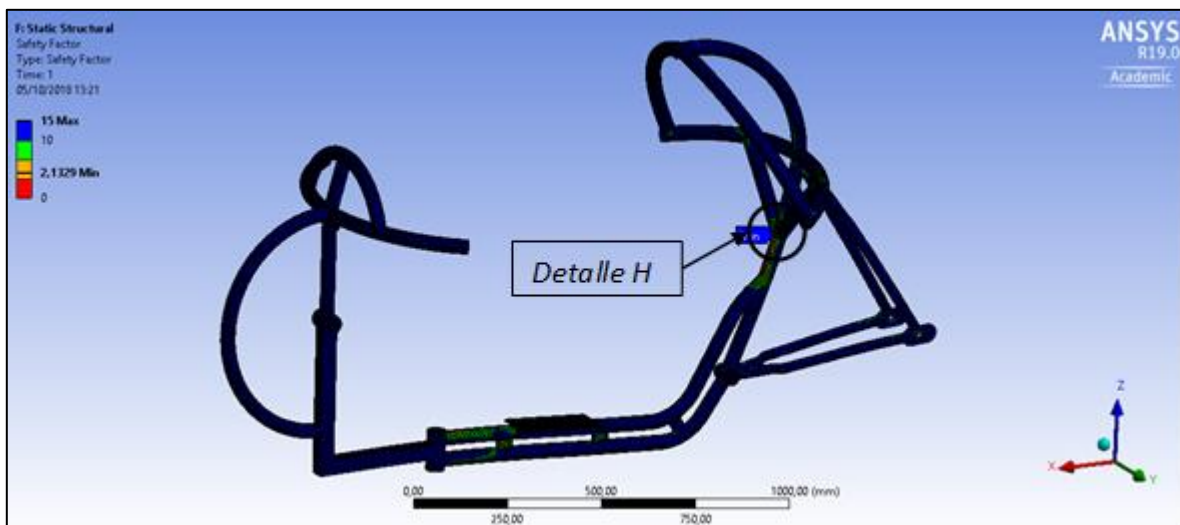
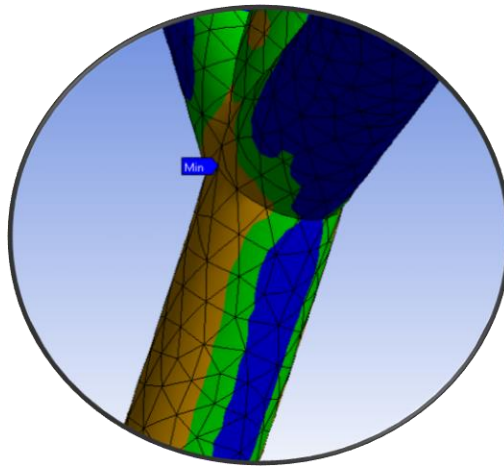


Figura 21. Diseño CAD 2: Menor factor de seguridad.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0



Detalle H - Figura 21. Punto con menor factor de seguridad.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

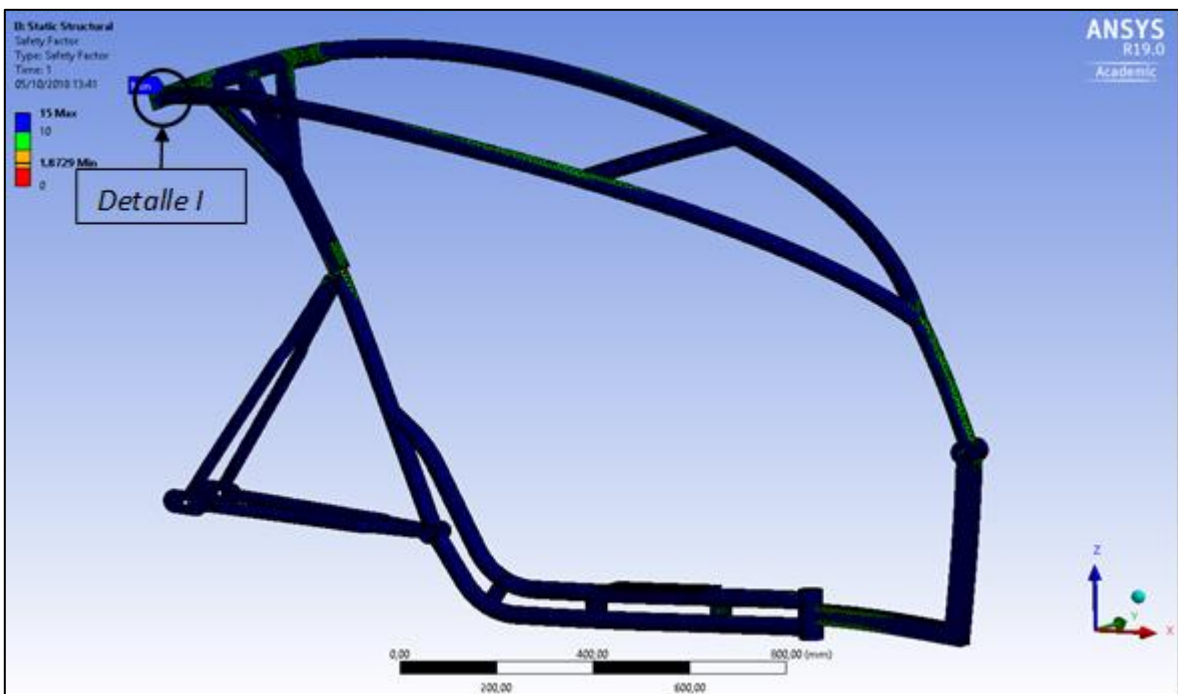
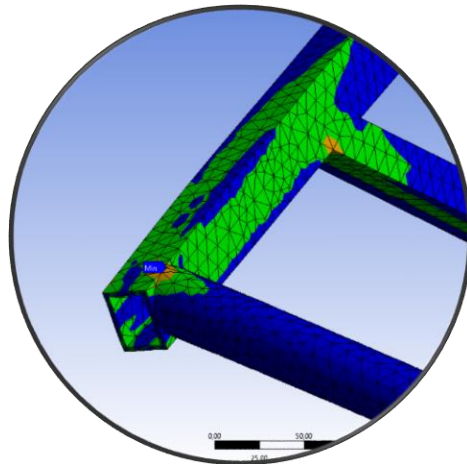


Figura 22. Diseño CAD 3: Menor factor de seguridad.

Nota. Elaboración propia en ANSYS 19.0

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Detalle I - Figura 22. Punto con menor factor de seguridad.

Nota. *Elaboración propia en ANSYS 19.0*

De la Figura 20 a la Figura 22, se muestran los puntos donde se generaron las menores condiciones para factor de seguridad para cada diseño CAD. Como se puede evidenciar, son los mismos puntos donde existe la mayor tensión de Von Mises (ver Ilustración 9 a la Ilustración 11) y esto es debido a que, al estar allí el punto con mayor tensión, por la definición de factor de seguridad y su equivalente (ver Ecuación 7 y sección 2.1.3), estará también allí el punto con menor factor de seguridad.

4.3 SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para la selección de la geometría – material adecuado, de las tablas 5, 6, y 7 se determina que los diseños CAD 1 y 3 en acero son los que presentan mejores condiciones, pues, siempre fueron aptas en el filtro hecho en las mismas tablas (ver Tabla 5, Tabla 6, y Tabla 7). Sin embargo, la jaula antivuelco del diseño CAD 1 presenta mejores condiciones para desplazamiento, y buenas condiciones de tensión y factor de seguridad. Además, la geometría del diseño CAD 1 es más simple para la construcción, ya que, en comparación con la geometría propuesta en el diseño CAD 3, esta presenta dos grandes dobleces para su construcción, lo cual dificulta el proceso constructivo, y debido a que es el prototipo a ser construido se opta por el diseño más simple; por otra parte, se selecciona el acero estructural para su construcción, pues primordialmente en el proceso de soldadura, dicho

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

material presenta una menor cantidad de inconvenientes. Por estas razones, se selecciona el diseño CAD 1 como geometría a construir.

Además, la geometría CAD 1 está diseñada con perfiles de tubería rectangulares, las cuales, reducen el esfuerzo de flexión en el sistema, pues, según lo establecido en el trabajo de grado “Dirección ‘tilting’ (por inclinación) trasera para Vehículo de Tracción Humana (VTH)”, los perfiles rectangulares presentan una mayor segundo momento de área y el esfuerzo de flexión es inversamente proporcional al mismo, reduciendo el esfuerzo. (Augusto et al., 2015)

4.4 CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA.

En función de dichos resultados inicialmente se realizó el proceso constructivo de la parte mecánica del VTH, para de allí seguir con la construcción de la jaula antivuelco, la construcción de esa parte inicial puede evidenciarse en la Figura 23.



Figura 23. Primer ensamble del chasis.

Nota. Toma propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Posteriormente se procedió con la construcción de la jaula antivuelco del Diseño CAD 1 previamente seleccionado, la cual puede observarse por medio de las Figuras 24 y 25 respectivamente, en las cuales también aparecen adicionalmente, la inclusión de otros elementos de la parte funcional al igual que el asiento del piloto.

Adicionalmente, fueron adicionados posteriormente dos cinturones de seguridad de dos puntos los cuales permiten que el piloto se quede pegado a la silla en caso de volcamiento, para evitar que el mismo sufra lesiones por salirse del vehículo.



Figura 24. Construcción de la jaula antivuelco propuesta en el diseño CAD 1.

Nota. Toma propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 25. Ensamble parcial de los componentes del VTH en el chasis con la jaula antivuelco del diseño CAD 1.

Nota. Toma propia.

En pro de verificar el comportamiento del VTH para la protección del piloto, fueron realizadas las pruebas de volcamiento en las cuales es posible observar que en ningún momento el piloto está en contacto con el suelo por lo cual brinda la protección exigida por el reglamento del concurso.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 26. Prueba de volcamiento a 180° vista isométrica.

Nota. Toma propia.



Figura 27. Prueba de volcamiento a 180° vista lateral.

Nota. Toma propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con lo cual se procedió a finalizar la construcción del VTH, sin embargo, en el proceso fue necesario entrar a realizar modificaciones dentro del mismo, como el cambio del tamaño de las ruedas delanteras, ya que en las pruebas dinámicas realizadas en el mismo fue posible observar una tendencia al volcamiento de este la cual se pudo mejorar al disminuir la distancia al suelo con unas ruedas más pequeñas.



Figura 28. Jaula antivuelco terminada en un 77,7% siendo pintada.

Nota. Toma propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 29. Jaula antivuelco terminada en un 88,8% vista isométrica.

Nota. Toma propia.



Figura 30. Jaula antivuelco terminada en un 88,8% vista lateral.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Nota. Toma propia.



Figura 31. Jaula antivuelco terminada

Nota. Toma propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 32. Equipo ITM y VTH terminado.

Nota. Tomado de: <https://www.instagram.com/expoingenieriaco/>

La jaula antivuelco al igual que el VTH se terminó satisfactoriamente, las medidas de la jaula antivuelco fueron elaboradas en aproximación a los planos que se realizaron (ver APÉNDICE A. Plano de la jaula antivuelco.), al igual que los arcos de esta, ya que, no se tenía una dobladora de tubos para hacer un buen acabado.

El presupuesto del VTH es presentado en el apéndice B (ver APÉNDICE B. Presupuesto de construcción del VTH.), en este caso es posible analizar que el valor total de los materiales requeridos para la construcción del VTH son de 1.420.400 COP sin embargo, en el presente estudio no fue considerado el valor de la mano de obra requerida para la construcción del mismo ya que, la misma fue realizada por los integrantes del semillero de electromecánica con el fin de participar en el concurso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.5 RESULTADOS DE LA JAULA ANTIVUELCO EN LA COMPETENCIA

En la competencia, específicamente en las pruebas de resistencia mecánica y volcamiento, el VTH presenta muy buenos resultados, pues, en la prueba de resistencia mecánica se evidenció lo obtenido en las simulaciones, no hubo deformaciones plásticas y en la prueba de volcamiento, el tripulante quedó totalmente protegido por la jaula antivuelco al rotar el VTH a 360° parcialmente. Se obtienen los puntajes máximos que se podían adquirir en cada una de las pruebas mencionadas (50 puntos).

La mejor prueba de la calidad de la jaula antivuelco construida son los resultados obtenidos dentro de la competencia, los cuales son expuestos a continuación, en la cual es posible observar que tanto en la prueba de resistencia mecánica como en la prueba de volcamiento se alcanzaron los máximos puntajes posibles para ambos casos, como lo muestra la carta de agradecimiento recibida por parte de la organización del evento en la Universidad de Antioquia:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Medellín, 18 de septiembre de 2018

Ingeniero
Julio Alberto Casas Monroy
Jefe de Mecatrónica y Electromecánica
Instituto Tecnológico Metropolitano

La Universidad de Antioquia en cabeza del Departamento de Ingeniería Mecánica, le agradece la asistencia del equipo de su universidad al **"II CONCURSO REGIONAL DE VEHÍCULOS DE TRACCIÓN HUMANA"**, el pasado 5 de agosto.

Los resultados finales de la prueba fueron:

Equipo	Nombre de equipo	Evento Diseño	Exposi- ción	Prueba de Resistencia mecánica	Prueba de Volcamient o lateral
		Puntaje	Puntaje	Puntaje	Puntaje
1	EAFIT	50	41,8	50	50
2	Scualo UDEA	40	42	50	50
3	ITM	45	38	50	50
4	Naranja Mecánica UPB	45	41,4	50	50
5	Shadow UPB	45	40,7	50	50
6	EIA	50	35,7	50	50
7	Pascual Bravo	0	38,3	50	50

Figura 33. Carta de agradecimiento por parte de la organización del evento

4.6 DISCUSIÓN

De las escrituras consultadas, la que más se asimila a lo que se desarrolló en este trabajo es el trabajo de grado titulado *"Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDÉS 2011"* (Patiño Molina, 2011). En esta, el autor también propuso tres modelos para las geometrías (ver Figura 34), en las cuales tanto el diseño del chasis como el diseño de la jaula antivuelco variaban para cada geometría. La discriminación para escoger la geometría adecuada también la hace por medio de los resultados arrojados para la tensión de Von Mises y la deformación, y el peso de la geometría. El material que utiliza el autor es aluminio, el cual le arroja resultados bajos para la tensión de Von Mises, pero deformaciones relativamente altas debido a la densidad baja del material (ver Figura 35).

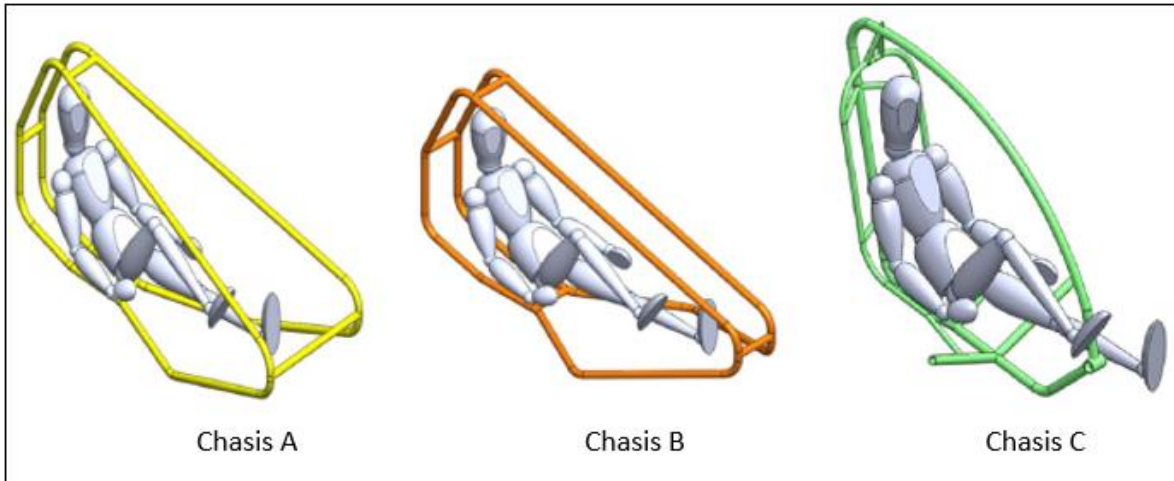


Figura 34. Geometrías propuestas para el trabajo de grado “Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011”.

Nota. Tomado de: *Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011.* (Patiño Molina, 2011)

	Esfuerzos Combinados (Mpa)	Deformación (mm)	Peso (gr)
Chasis A	74.243	13.189	9128.68
Chasis B	72.710	13.413	8920.99
Chasis C	99.001	6.342	7862.68

Figura 35. Resultados de las simulaciones para el trabajo de grado “Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011”.

Nota. Tomado de: *Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNIANDES 2011.* (Patiño Molina, 2011)

En el trabajo de grado presentado por Patiño Molina, las geometrías simuladas presentan más concentradores de esfuerzo que las simuladas en este trabajo de grado, ya que, las geometrías que él propone tienen más cambios bruscos en la tubería en comparación a las presentadas aquí.

Al igual que los resultados de deformación aquí presentados y las geometrías presentadas por Patiño Molina se tienen grandes secciones de tubería sin apoyos lo cual hace que sean allí donde se presenten los puntos con mayor deformación.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

- Se realiza las simulaciones de cada diseño CAD bajo las condiciones de frontera y materiales establecidos, se compilan y grafican los datos los cuales entran a ser discriminados. En la discriminación de los resultados se concluye que el diseño CAD 1 es el que mejor resultados obtiene en comparación a los demás. Se construye la geometría y se logran muy buenos resultados para resistencia mecánica y prueba de volcamiento en la competencia.
- Se realizan los bocetos pertinentes para los tres diseños CAD. Estos son modelados sin problemas en la versión académica de Solid Edge ST9. Los diseños CAD cumplen con el requisito de la competencia que es proteger al piloto.
- Los bocetos son importados a la plataforma de simulación ANSYS 19.0 donde son simulados bajo las condiciones de frontera establecidas y bajo cada uno de los tres materiales sin problemas. Debido a la exigencia computacional para realizar un mallado más pequeño y lograr independencia de malla, en algunas geometrías las tres variables no alcanzaron dicha independencia, por lo que, se filtró dicha independencia por medio de la variable que sí lo logró.
- Por medio de los datos arrojados en las simulaciones, se concluye que el Diseño CAD 1 presenta las mejores condiciones desplazamiento y buenas condiciones para tensión de Von Mises y factor de seguridad, por lo tanto, se concluye, es la geometría idónea para la construcción, puesto que a su vez ofrece las mayores facilidades constructivas.
- Se realizan los planos y el presupuesto de la construcción del VTH en general con la jaula antivuelco, estos son mostrados en el apartado para el apéndice. (ver

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE A. Plano de la jaula antivuelco. y APÉNDICE B. Presupuesto de construcción del VTH.)

5.2 RECOMENDACIONES

- Considerar la construcción de la jaula antivuelco en materiales menos pesados, ya que, si no se tiene en cuenta este factor, el vehículo tendrá dificultades en el desplazamiento como sucedió en nuestro caso en la competencia.
- Acorde con el trabajo de grado “Diseño y Construcción de Vehículo de Tracción Humana para la competencia UNIANDES 2011” (Patiño Molina, 2011), importar los diseños CAD a la plataforma de ANSYS como “Cuerpos de líneas” y no como “Cuerpos sólidos” para optimizar el tiempo de simulación y reducir la cantidad de nodos y elementos.

5.3 TRABAJO FUTURO

- Seguir investigando y desarrollando modelos de bajo peso, fáciles de guardar y seguros; en pro de generar soluciones prácticas a las problemáticas de movilidad, puesto que los VTH son vehículos ergonómicos, estables y cómodos en su manejo, además de ser amigables con el medio ambiente.

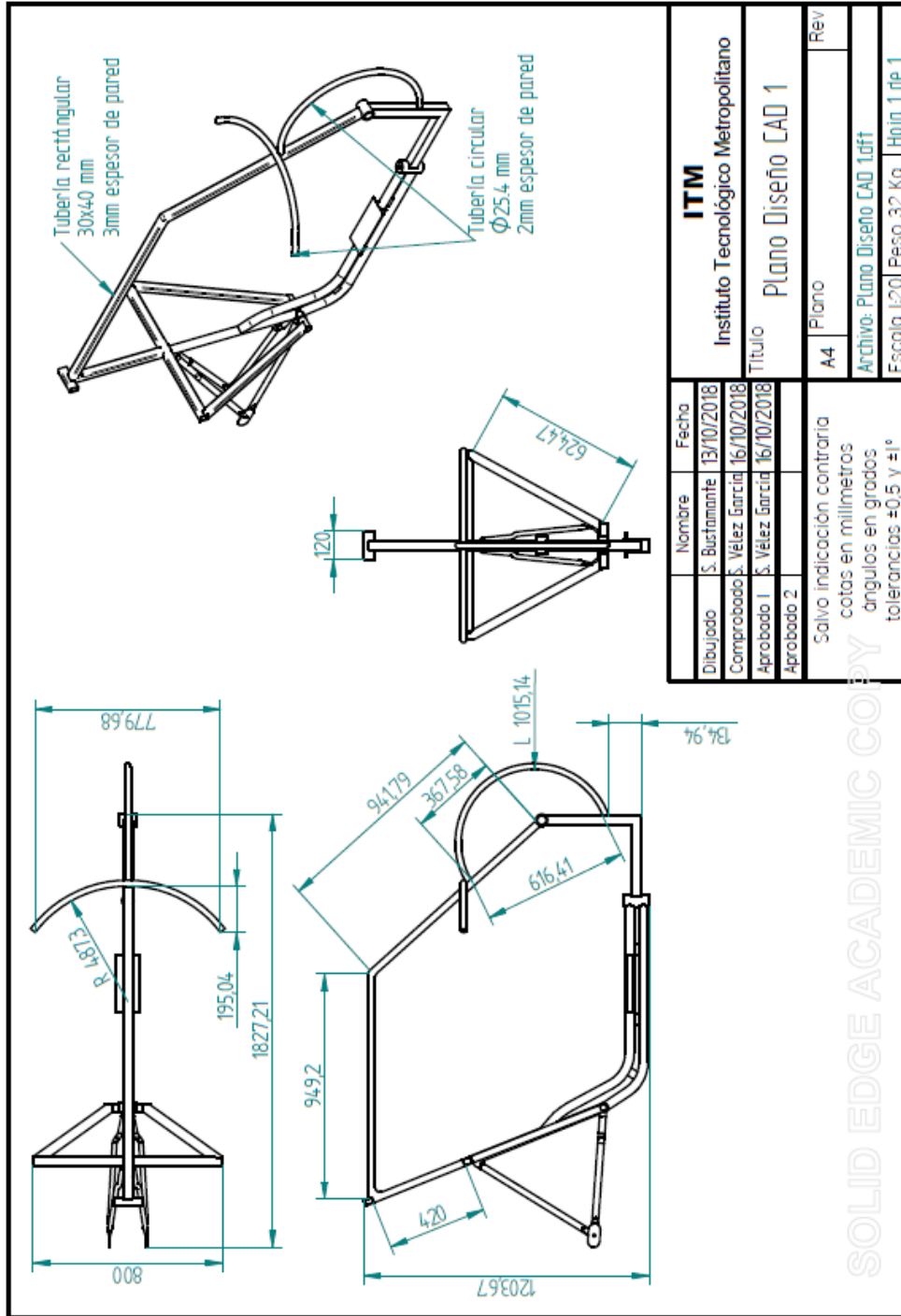
	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Aguirre Rojano, H. D., & Pinedo Fuentes, S. M. (2017). *Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH) para desplazamiento sobre el río Sinú y rutas pavimentadas de la ciudad de montería*. Universidad de Córdoba.
- Augusto, C., Camargo, R., Mario, L., & Sandoval, M. (2015). Dirección “tilting” (por inclinación) trasera para vehículo de Tracción Humana (VTH), 77.
- Departamento de Ingeniería Mecánica, U. de A. (2018). Reglamento Competencia Local, 1–10.
- García Negrete, A., & Peña Doria, A. A. (2017). *Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH), enfocado a la movilidad sostenible y adaptable a las condiciones del terreno en el municipio de montería*. Universidad de Córdoba.
- Gore, I. G. E., Branch, N., Roman, T., Orange, E., Wayne, K., & Gore, R. A. (1998). United States Patent (19), (19). <https://doi.org/US005485919A>
- Patiño Molina, F. J. (2011). Diseño y Construcción de Vehículo de Tracción Humana para la competencia UNIANDES 2011, 53, 109. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., & DeWolf, J. T. (2010). *Mecánica de materiales (5a. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Vásquez, J. (2012). *Análisis y diseño de piezas de máquinas con catia v5 - 2a ed.* Alfaomega.

APÉNDICE

APÉNDICE A. Plano de la jaula antivuelco.

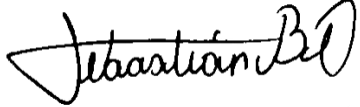


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


APÉNDICE B. Presupuesto de construcción del VTH.

Componente	Precio unitario	Cantidad	Precio
Chasis	\$ 180.000	1	\$ 180.000
Ruedas con freno de disco	\$ 100.000	3	\$ 300.000
Placas aluminio	\$ 37.000	2	\$ 74.000
Tubo 1 1/2" x 1" x 6m	\$ 50.000	1	\$ 50.000
Asiento	\$ 27.000	2	\$ 54.000
Levas de freno	\$ 8.500	3	\$ 25.500
Levas de cambios	\$ 4.700	2	\$ 9.400
Guía cadena bicicleta	\$ 37.000	6	\$ 222.000
Desviador trasero cadena	\$ 35.000	1	\$ 35.000
Desviador delantero cadena	\$ 24.500	1	\$ 24.500
Pedales y platos delanteros	\$ 34.700	1	\$ 34.700
Discos pulidora	\$ 9.800	5	\$ 49.000
Soldadura 6011	\$ 12.300	1	\$ 12.300
Mano de obra	\$ 350.000	1	\$ 350.000
Total			\$ 1.420.400

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



FIRMA ESTUDIANTES _____


 Sebastián Velásquez G.
 primera entrega
 informe final
 19/10/2018

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: 19/10/2018

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____