



**ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN MEDIANTE SOFTWARE COMPUTACIONAL DE LA
BARRA ESTABILIZADORA DELANTERA DE UN HYUNDAI ELANTRA 1.6 4DR 2010
AFECTADA POR LOS BACHES EN LA CIUDAD DE QUITO – ECUADOR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz

Autor: Pablo Esteban Rivera Narváez

Tutor: Ing. Jaime Molina M. Sc.

Facultad de ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Internacional SEK

Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz

Quito, 2023

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Pablo Esteban Rivera Narvález, con cédula de identidad N° 1717412280, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente. El presente trabajo pertenece al programa de Ingeniería Mecánica Automotriz.



Pablo Esteban Rivera Narvález

C.I.: 1717412280

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

En el presente trabajo de investigación titulado:

**“ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN MEDIANTE SOFTWARE COMPUTACIONAL DE
LA BARRA ESTABILIZADORA DELANTERA DE UN HYUNDAI ELANTRA 1.6 4DR
2010 AFECTADA POR LOS BACHES EN LA CIUDAD DE QUITO – ECUADOR”**

Realizado por:

PABLO ESTEBAN RIVERA NARVÁEZ

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.



M. Sc. Jaime Vinicio Molina Osejos

LOS PROFESORES INFORMANTES:

Después de revisar el trabajo presentado, lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.



Ing. Diego Bustamante M.Sc.

FIRMA



Ing. Diana Peralta M.Sc.

FIRMA

Quito, 04 de diciembre de 2023

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



Pablo Esteban Rivera Narváez

C.I.: 1717412280

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis amados padres Fabricio y Magali, quienes han sido mi verdadera brújula y mi sostén; a mi querida hermana Salomé, mi sombra y mi soporte; a mis compañeras de vida de otra especie, Luna y Maya, por su inmensa fidelidad. Es dedicado también a mi tía Lucía, mi abuelo Ramiro, mi abuela Ismeria y Margarita y a las personas que han estado en mi entorno de manera positiva y han aportado de una u otra forma para mi desarrollo y formación en la vida.

Todo el esfuerzo y sacrificio que he realizado y que lo seguiré haciendo a lo largo de mi vida es por y para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la vida y a mi familia, por haberme dado la oportunidad de estudiar y nutrirme de conocimiento en una rama que me genera mucha pasión y por siempre haberme apoyado de forma incondicional a lo largo de toda mi carrera para poder cumplir con el objetivo de formarme como un gran profesional y contribuir de manera positiva a la sociedad.

Quiero también agradecer de igual manera a todos mis amigos y profesores, especialmente al Msc. Jaime Molina, por haber compartido conmigo su conocimiento y de este modo permitir mi formación como un ingeniero de excelencia. Así mismo por haberme brindado un gran apoyo y guía durante todo el desarrollo de mi tesis.

Y sobre todo agradezco a la vida misma que me permitió vivir tantas experiencias, siendo la formación académica una de ellas. Pero por sobre todo hay alguien a quien quiero agradecer, y es a mí mismo, pues he sabido superarme cada día más a pesar de mis falencias y errores.

He conocido el verdadero significado de la vida a través de la vivencia misma de ella.

Por todo eso y más...siempre gracias.

ÍNDICE

1.	15
1.1.	15
1.2.	16
1.3.	18
1.4.	17
1.4.1.	17
1.4.2.	17
1.5.	18
2.	21
2.1.	21
2.2.	24
2.2.1.	24
2.2.2.	25
2.2.3.	27
2.2.3.1.	30
2.2.3.2.	32
2.2.4.	35
2.2.5.	36
2.3.	36
2.4.	42
2.4.1.	42
2.5.	43
3.	46
3.1.	46
3.1.1.	46
3.1.2.	46
3.2.	48
3.3.	59
3.3.1.	60
3.3.1.1.	62

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

3.3.2.	64	
3.3.3.	69	
4.	73	
4.1.	73	
4.2.	77	
Caso de estudio 1		77
4.3.	79	
Caso de estudio 2		79
4.4.	81	
Caso de estudio 3		80
4.5.	82	
Caso de estudio 4		82
5.	84	
5.1.	84	
5.2.	85	
5.3.	86	
5.4.	87	
5.5.	88	
5.6.	89	
6.	90	
7.	92	
ANEXOS		96

ÍNDICE DE FIGURAS

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 1	15
Vía llena de agujeros – ruta Calderón-Carcelén	15
Figura 2	16
Agujero prominente en Av. De la Prensa – sector Base Aérea	16
Figura 4	20
Agujero pronunciado en la vía – sector Carcelén	20
Figura 5	22
Sistema de suspensión delantero – Hyundai Elantra 1.6L 4DR 2010	22
Figura 6	23
Despiece del sistema de suspensión delantero – Hyundai Elantra 1.6L 4DR 2010	23
Figura 7	24
Muelles helicoidales de compresión	24
Figura 8	26
Conjunto de amortiguadores	26
Figura 9	28
Diagrama de fuerzas de la barra estabilizadora	28
Figura 10	30
Barra estabilizadora delantera	30
Figura 11	31
Relación entre flexibilidad y balanceo de la barra estabilizadora	31
Figura 12	34
Relación entre flexibilidad y balanceo de la barra estabilizadora	34
Figura 13	35
Bieleta de sujeción de la barra estabilizadora delantera	35
Figura 14	38
Connotación de la ecuación general de torsión elástica	38
Figura 15	39
Diagrama simplificado de la barra estabilizadora del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010	39
Figura 16	41
Diagrama de principales fuerzas en una barra de torsión	41
Figura 17	44
Ejemplo de un modelo 3D analizado en el software SimSolid	44
Figura 18	47
Flujograma de pasos realizados para el desarrollo del proyecto	47
Figura 19	49
Diseño 3d – Marco inferior (pieza)	49
Figura 20	49
Diseño 3d – Amortiguador (ensamble)	49
Figura 21	50
Diseño 3d – Tuerca de ajuste del muelle helicoidal (pieza)	50
Figura 22	50
Diseño 3d – Muelle helicoidal (pieza)	50
Figura 23	51
Diseño 3d – Cuerpo del amortiguador (ensamble)	51

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 24	51
Diseño 3d – Cuerpo del amortiguador (pieza)	51
Figura 25	52
Diseño 3d – Tapa de sello del cuerpo del amortiguador (ensamble)	52
Figura 26	52
Diseño 3d – Tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)	52
Figura 27	53
Diseño 3d – O-ring de la tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)	53
Figura 28	53
Diseño 3d – Separador de tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)	53
Figura 29	53
Diseño 3d – Cubierta de la tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)	53
Figura 30	54
Diseño 3d – Puntal del amortiguador (ensamble)	54
Figura 31	54
Diseño 3d – Eje del amortiguador (pieza)	54
Figura 32	55
Diseño 3d – E-clip del amortiguador (pieza)	55
Figura 33	55
Diseño 3d – Copa del amortiguador (pieza)	55
Figura 34	55
Diseño 3d – Conexión inferior del amortiguador	55
Figura 35	56
Diseño 3d – Rodamiento de bola de la base del amortiguador (pieza)	56
Figura 36	56
Diseño 3d – Brazo inferior/barra oscilante (ensamble)	56
Figura 37	57
Diseño 3d – Brazo de control (pieza)	57
Figura 38	57
Diseño 3d – Esfera de rotación	57
Figura 39	58
Diseño 3d – Barra estabilizadora (pieza)	58
Figura 40	58
Diseño 3d – Neumático (ensamble)	58
Figura 41	59
Ensamble del conjunto de suspensión – SimSolid	59
Figura 42	61
Prueba de desconexión – SimSolid	61
Figura 43	63
Designación de material para un elemento del conjunto de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010	63
Figura 44	66
Designación de los soportes inamovibles del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 en SimSolid	66

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 45	67
Ubicación de la carga que será aplicada al sistema de suspensión debido a un bache	67
Figura 46	72
Diagrama de cuerpo libre de la barra estabilizadora sometida a una fuerza de bache	72
Figura 47	73
Diagrama de fuerzas de la barra estabilizadora sometida a fuerza de bache	73
Figura 48	73
Diagrama de momentos de la barra estabilizadora sometida a fuerza de bache	73
Figura 49	76
Resultado del 1er caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y	76
Figura 50	78
Resultado del 2do caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y	78
Figura 51	79
Resultado del 3er caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y	79
Figura 52	81
Resultado del 4to caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y	81
Figura 53	83
Deformación del sistema de suspensión bajo condiciones de carga producida por baches	83

ÍNDICE DE TABLAS

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Tabla 1	64
Conexiones totales en el ensamble del conjunto de suspensión delantero del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010	64
Tabla 2	66
Materiales del sistema de suspensión delantero Hyundai Elantra HDR 1.6 2010	66
Tabla 3	69
Magnitud de la fuerza implicada en cada condición de trabajo para el conjunto de suspensión	69
Tabla 4	87
Tabla de porcentajes de error en cuanto a valores de deformación respecto a la carga aplicada	87
Tabla 5	89
Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 1er caso de estudio	89
Tabla 6	89
Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 2do caso de estudio	89
Tabla 7	90
Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 3er caso de estudio	90
Tabla 8	91
Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión –4to caso de estudio	91

RESUMEN

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

El mal estado de las vías de circulación de la ciudad de Quito afecta a todo tipo de vehículos que transitan por las mismas, afectando a sus sistemas de suspensión, y en ciertos casos afecta específicamente a elementos que no están diseñados para soportar dichos impactos, tal es el caso de la barra estabilizadora del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010, lo cual genera una reducción de su vida útil. Por lo tanto se realizó una simulación del sistema de suspensión en condiciones de bache (fuerza) mediante el software SimSolid para evaluar el desempeño de este componente y como es afectado. La deformación obtenida para una fuerza de 6500 Newtons fue de 24.83 milímetros, en comparación al valor teórico permitido de 22.65 milímetros, obteniendo un porcentaje de error de 9.49%, lo cual garantiza la veracidad de la simulación. De este modo se evidenció que la barra estabilizadora posee una sobrecarga de esfuerzos para los cuales no fue diseñada poniendo en riesgo así su vida útil y el buen desempeño de la pieza y de todo el conjunto de suspensión.

Palabras clave: Barra estabilizadora, performance, vías, sobrecarga, simulación SSM, desempeño, suspensión.

ABSTRACT

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

The poor condition of the roads in the city of Quito affects all types of vehicles that travel through them, affecting their suspension systems, and in certain cases it specifically affects elements that are not designed to withstand such impacts, such as This is the case of the stabilizer bar of the Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010, which generates a reduction in its useful life. Therefore, a simulation of the suspension system under bump (force) conditions was carried out using the SimSolid software to evaluate the performance of this component and how it is affected. The deformation obtained for a force of 6500 Newtons was 24.83 millimeters, compared to the allowed theoretical value of 22.65 millimeters, obtaining a percentage error of 9.49%, which guarantees the veracity of the simulation. In this way, it is evident that the stabilizer bar has an overload of forces for which this element was not designed for, thus putting at risk its useful life and the reliable performance of the part and the entire suspension assembly.

Keywords: Stabilizer bar, performance, roads in Quito, suspension, SSM simulation, performance, overload.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes de la investigación

La comodidad, el confort y sobre todo la seguridad en los vehículos se han convertido a través de los años en factores de suma importancia dentro de la industria. No obstante, la responsabilidad para lograr estos fines no solo recae en el vehículo, pues el terreno por donde se desplazará el mismo tiene gran parte del compromiso. El ejemplo perfecto para esta temática tiene que ver específicamente con la ciudad de Quito y sus vías de circulación urbana para desplazarse de un punto a otro dentro de su perímetro. El descuido por parte de las entidades y autoridades a cargo del mantenimiento de estas vías y el temporal atípico de la ciudad han ocasionado un enorme deterioro en gran parte de la urbe quiteña.

Desde automóviles livianos hasta vehículos de carga pesada sufren los efectos y consecuencias de esta degradación de las vías, específicamente el sistema de suspensión. Este conjunto de componentes se encarga de absorber y amortiguar las irregularidades del camino para de este modo brindar el mayor confort posible al usuario de este mismo.

Figura 1

Vía llena de agujeros – ruta Calderón-Carcelén



ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. En la figura 1 se ilustra el estado de las vías de circulación de Quito, específicamente en el sector del intercambiador de Carcelén.

El nivel del daño es de tal magnitud, que inclusive funcionarios de la empresa pública EPMMOP señalan que ninguna vía, o quizás muy pocas, se encuentran en un óptimo estado, adecuado para su correcto desempeño. Es por esto por lo que, desde el término del 2021, la empresa pública SERCOP dio a conocer los procesos iniciados que tienen relación a las vías de circulación urbanas tanto automovilísticas como peatonales. (EPMMOP, 2022)

Figura 2

Agujero prominente en Av. De la Prensa – sector Base Aérea



Nota. En la figura 2 se ilustra el estado de las vías de circulación de Quito, específicamente en el sector la Av. de la Prensa.

Planteamiento del problema de investigación

El problema surge a raíz de cómo el deficiente estado vial de la urbe de Quito influye en el sistema de suspensión vehicular, específicamente sobre la barra estabilizadora y su desempeño. Este elemento está sujeto a efectos de torsión cuando el vehículo toma una curva,

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

esa es su función principal. No obstante, al poseer dos puntos de anclaje al chasis y al estar expuesta a constantes impactos debido a los baches de las vías, este elemento también sufre efectos de flexión, lo cual no forma parte de su misión principal. Según estudios realizados en 2022 por parte de la Empresa Metropolitana de Movilidad y Obras públicas (Epmmp) el porcentaje de vías afectadas ronda el 45-55 % comprendido en toda la extensión de la ciudad.

El estado de las mencionadas vías de circulación de Quito contribuye al prematuro desgaste de estos elementos de suspensión debido al aumento en la frecuencia de amortiguación de estas fuerzas de impacto. Este desgaste y deformación en la barra estabilizadora se traduce en una reducción significativa en su vida útil incluso llegando a tal punto de causar deformaciones irreversibles. Lo cual implicaría el reemplazo de la pieza y la verificación de otros posibles daños.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

- Analizar mediante una simulación dinámica en Altair SimSolid el comportamiento del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 4DR 1.6 2010 para evidenciar los efectos en la barra estabilizadora debido al deficiente estado vial de la ciudad de Quito.

Objetivos específicos

- Recolectar información actual acerca del deficiente estado vial en la ciudad de Quito y sus principales causas mediante investigación bibliográfica para verificar el estado de las mencionadas vías de circulación.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

- Replicar el sistema-conjunto de suspensión (Hyundai Elantra 4DR 1.6 2010) mediante el uso de un software computacional – Autodesk Inventor para poder realizar las diversas simulaciones de carga en Altair SimSolid.
- Comparar el comportamiento de la barra estabilizadora frente a los baches mediante inspección visual en los resultados de las varias simulaciones en SimSolid y de este modo analizar cómo podría afectar el resultado de dichas simulaciones en el desempeño del vehículo y en la seguridad de sus ocupantes.

Formulación de la hipótesis

Un adecuado modelado 3D y una correcta simulación del sistema de suspensión delantero del Hyundai Elantra 1.6HDR 2010 ayudará a evidenciar la magnitud, lo más cercana a la realidad, de las posibles deformaciones causadas por los numerosos baches de las vías de circulación de la ciudad de Quito que impactan sobre todo a la barra estabilizadora, afectando a su vida útil debido al impacto recurrente que absorbe esta misma.

Justificación e importancia de la investigación

Vías cuarteadas y con grietas, huecos, baches, veredas destruidas; ese es el panorama que presenta la ciudad de Quito, capital de Ecuador. Una problemática que ha ido creciendo a lo largo de los años y que no se solucionará si los organismos e instituciones encargadas de esta gestión no toman cartas en el asunto. Esta situación se ha vuelto cada vez más crítica a causa también del fuerte y complicado temporal que suele golpear a la ciudad. En la figura 3 se puede apreciar lo antes mencionado. Según varios estudios realizados en el mes de marzo del presente año por parte de la empresa estatal Epmmp, se estima que el mal estado de las vías urbanas alcanza un valor cercano al 50% o inclusive un porcentaje mayor. Señalando también que las

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

medidas provisionales se están agotando por lo que se requiere una contundente intervención integral. (EPMMOP, 2022)

Figura 3

Vía cuarteada – sector Carcelén



Nota. En la figura 3 se ilustra el estado de las vías de circulación de Quito, específicamente en el sector del intercambiador de Carcelén.

Estos inconvenientes viales afectan a la mayoría de la población debido a la necesidad de uso de las vías para la movilización, véase la figura 4. Si bien es cierto, según reportes de la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (Epmmpop) actualmente se están realizando trabajos de reparación y tratamiento sobre todo en las calles, avenidas y carreteras de mayor prioridad. Estos trabajos en su mayoría consisten en una repavimentación vial alrededor de la urbe quiteña, pues el tema de la reparación no puede ser tratado solo con medidas temporales y provisionales, tales como el bacheo, el rellenado, pues las vías de circulación necesitan una renovación inmediata y consistente.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 4

Agujero pronunciado en la vía – sector Carcelén



Nota. En la figura 4 se ilustra el estado de las vías de circulación de Quito, específicamente en el sector del intercambiador de Carcelén.

Estos inconvenientes en las calles afectan directamente a los vehículos que transitan por las mismas, concretamente a sus respectivos sistemas de suspensión. Pues al estar en un constante impacto con los baches generan un mayor desgaste en las partes que los conforman, tales como amortiguadores, bieletas de sujeción y barras estabilizadoras.

Para entender un poco mejor la función de la barra estabilizadora se establece el siguiente escenario: cuando se está transitando en una curva se generan esfuerzos de torsión en la barra estabilizadora en el lado opuesto al giro por efecto de la transferencia de peso que existe en el auto. La barra estabilizadora absorbe dichos esfuerzos y ayuda a que las llantas se mantengan pegadas al piso y el vehículo no se despegue del mismo.

Esta barra de torsión como se detalló previamente cumple la función de soportar esfuerzos/cargas torsionales y no de otro tipo tal como flexión, compresión, tracción, etc. Sin

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

embargo, el deficiente estado de las calles de Quito y sus baches generan esfuerzos adicionales en esta pieza. Los impactos de los neumáticos con los baches se traducen en fuerzas axiales que afectan a la barra estabilizadora y generan esfuerzos de flexión sobre la misma, lo cual pone en riesgo la integridad de la pieza y por ende su funcionalidad. A tal punto de llegar a tener deformaciones irreversibles o incluso la rotura de la barra estabilizadora.

Esta situación puede seguir complicándose a tal punto de afectar a otros componentes del sistema, más aún con el deficiente estado de las vías y sus baches. En ocasiones el daño es progresivo hasta la falla completa del elemento o conjunto, todo esto incluso sin que el usuario del vehículo lo note. Esto se traduce en inseguridad a la hora de conducir y por ende un mayor riesgo de la integridad del vehículo y de sus ocupantes.

El vehículo seleccionado para el presente estudio es un Hyundai Elantra 1.6 HD 2010; el motivo por el cual este vehículo fue escogido es debido a que el autor de la presente tesis es propietario de este y se ha podido constatar que las vías en mal estado pueden afectar a diversas partes/sistemas del vehículo. Además de esto se tiene fácil acceso el manual de usuario, el vehículo en sí mismo para poder realizar el modelado 3D y cierta información del vehículo que será de mucha ayuda para la realización de este trabajo de titulación.

ESTADO DEL ARTE

Sistema de suspensión

El sistema de suspensión de un vehículo hace parte de la seguridad activa del mismo y se puede definir como un conjunto de elementos cuya función es mantener el contacto de la llanta con el suelo, brindando la estabilidad y seguridad necesaria para los usuarios. Este sistema cumple el cometido de absorber todo tipo de movimientos y vibraciones que se producen por las

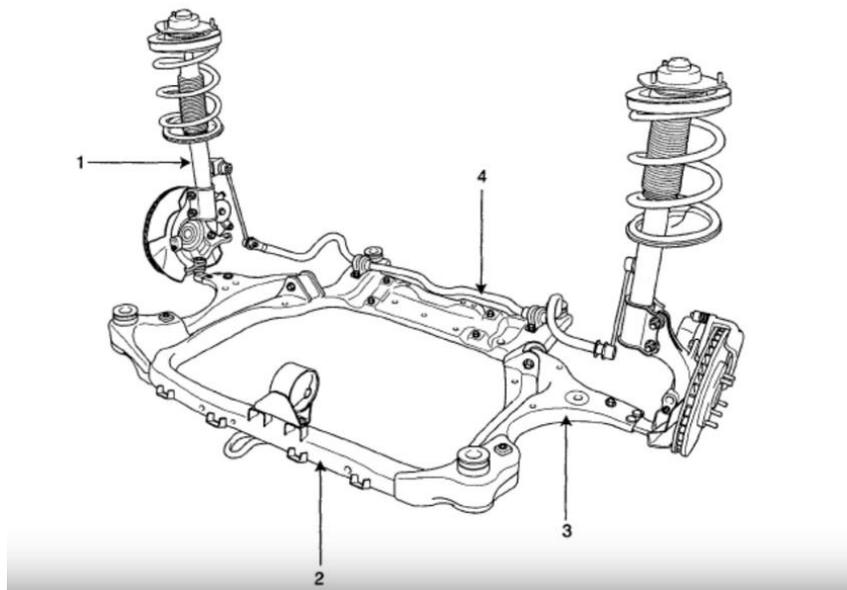
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

ruedas en la deformación del vehículo. De este modo, todo este tipo de interacciones no son transmitidas directamente al chasis del vehículo evitando así deformaciones en el mismo y sobre todo brindando el máximo confort y seguridad a sus ocupantes. (Carabias Acosta, 2022)

Hablando específicamente del sistema de suspensión del Hyundai Elantra 1.6L 4DR 2010, este puede ser subdividido en 4 subconjuntos principales. Está claro que existen muchos elementos y piezas que conforman el sistema de suspensión delantera como tal. Sin embargo, para el presente estudio no serán detallados a profundidad estos elementos, tales como pernos, abrazaderas, silentblocks, pues si bien forman parte del sistema, no son elementos determinantes a la hora de evaluar el desempeño de la suspensión y del objetivo de estudio. En las siguientes figuras se puede apreciar estos subconjuntos y sus respectivos nombres:

Figura 5

Sistema de suspensión delantero – Hyundai Elantra 1.6L 4DR 2010



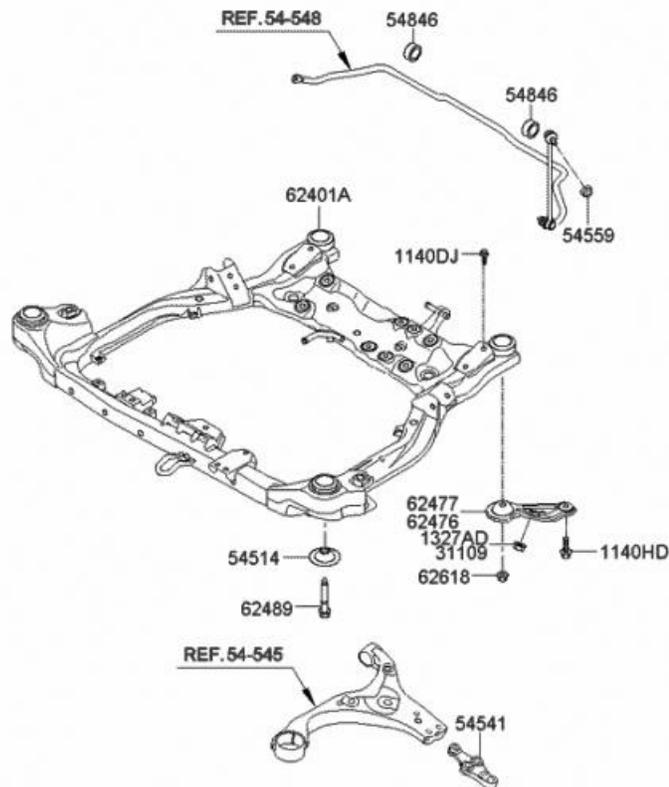
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. En la figura 5 se aprecian los conjuntos que conforman la suspensión delantera del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Tomado de 2006-2010 Hyundai Elantra Service Repair Manual [Figura], por Hyundai, 2007, (<https://www.manua.ls/hyundai/elantra-2010/manual>).

- 1- Conjunto muelle-amortiguador
- 2- Marco inferior
- 3- Brazo inferior de suspensión
- 4- Barra estabilizadora

Figura 6

Despiece del sistema de suspensión delantero – Hyundai Elantra 1.6L 4DR 2010



Nota. En la figura 6 se aprecia el despiece de los conjuntos que conforman la suspensión delantera del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Tomado de 2006-2010 Hyundai Elantra Service

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Repair Manual [Figura], por Hyundai, 2007, (<https://www.manua.ls/hyundai/elantra-2010/manual>).

Componentes del sistema de suspensión Hyundai Elantra 2010

Resortes o muelles

Figura 7

Muelles helicoidales de compresión



Nota. En la figura 7 se aprecia los muelles helicoidales pertenecientes al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Tomado de MotorDoctor [Figura], por MotorDoctor, S/F, (https://www.motordocor.es/search-carparts?keyword=muelles+de+suspension&maker_id=183&group_id=653).

Estos elementos, como su nombre lo indica, son grandes resortes que se utilizan en el sistema de suspensión de un vehículo. Están localizados entre el chasis/bastidor del auto y. Su función primordial es absorber las irregularidades del terreno al momento de su deformación, esto gracias a sus buenas cualidades y propiedades elásticas. Por tanto, la energía mecánica que se

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

produce por el rodaje del vehículo es recogida y absorbida por los muelles del amortiguador evitando así deformaciones permanentes tanto en el sistema de suspensión como en el automotor como tal. (Carabias Acosta, 2022)

Las fuerzas que actúan en estos elementos son de compresión y su interacción es similar a las fuerzas que intervienen en barras cargadas axialmente. Esto implica que en muchas ocasiones puede producirse pandeo, pues los muelles al ser largos y finos pueden no solamente comprimirse sino también doblarse y sus extremos tienden a juntarse. Es por esto que la relación entre el diámetro y la longitud de los muelles definen esta carga crítica, sin embargo, hay un detalle que define mucho más esta carga, la fijación de los extremos del muelle. Si los extremos están fijados y la relación mencionada anteriormente es menor a 5, lo más seguro es que no se produzca pandeo. (Carabias Acosta, 2022)

Hablando específicamente de los muelles utilizados en el sistema de suspensión del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010 son del tipo helicoidal cilíndrico de compresión. Las siguientes medidas son individuales de cada muelle. Su longitud en mm es de 327, su diámetro en mm es de 174,4 y espesor en mm es de 14,2. Su peso en kg es de 3.08. Pertenecen a la marca comercial KYB. El material para estos resortes de suspensión es una aleación de alta calidad 55CrSi después del enfriamiento de aceite. (Hyundai, 2010)

Amortiguadores

Por su parte, los amortiguadores son los elementos del sistema de suspensión encargados de transformar la energía mecánica que fue absorbida por los muelles en energía calorífica. La disipación de este tipo de energía se realiza a través del aceite que fluye dentro de los

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

amortiguadores; de hecho, el aceite se puede determinar como el principio de funcionamiento de estos mismos. (Castro Morales, 2021)

Al poder convertir la energía cinética en calorífica se logra controlar y estabilizar de una manera mucho más eficaz los movimientos oscilatorios. Estas oscilaciones se producen en todo el sistema de suspensión al momento de que la energía mecánica es absorbida por los muelles. De este modo se logra controlar las irregularidades del camino garantizando el confort y sobre todo la seguridad de los usuarios. (Castro Morales, 2021)

Los amortiguadores utilizados en el vehículo del presente estudio pertenecen a la marca TRW, son un sistema de doble tubo del tipo presión de gas. El tipo de sujeción de estos amortiguadores es de puente en la parte inferior, y de espiga en la parte superior. Su diámetro en la parte más gruesa en mm es de 48,6, mientras que el diámetro del tubo vertical en mm es de 15. La longitud de estos es variable, pues por su función tienden a comprimirse y por tanto cambiaría esta magnitud. El rango de esta medida en mm va de los 505,5 a los 335,3. (Hyundai, 2010)

Figura 8

Conjunto de amortiguadores



ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. En la figura 8 se aprecian los amortiguadores pertenecientes a la suspensión delantera del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Tomado de Amazon [Figura], por Amazon, S/F, Detroit Axle.

<https://www.amazon.com/-/es/stores/DetroitAxle/page/B6888A18-F650-4818-9401-2E4B5F114E7D?ref =ast bln>).

Barra estabilizadora

La barra estabilizadora o barra de torsión cumple la importante función de minimizar el posible balanceo del vehículo al tomar una curva. Este elemento de acero AISI 5160, ligeramente flexible, une los dos neumáticos de un mismo eje y a su vez va anclado a alguna parte del chasis. (Castro Morales, 2021)

La función de este elemento se relaciona directamente a que cuando uno de los dos lados de la carrocería se inclina debido al giro del vehículo en una curva, también lo hace el otro lado para contrarrestar el efecto de este giro y de este modo garantizar la estabilidad del vehículo. Sin embargo, para que esta pieza pueda cumplir su objetivo necesita la colaboración de otros elementos, tales como las bieletas de sujeción/unión, estas piezas cumplen la función de unir la barra estabilizadora al conjunto de la suspensión. Básicamente están conformadas por dos rótulas, las cuales permiten el ligero movimiento de la barra estabilizadora, al mismo tiempo que la mantienen fija y unida al conjunto de suspensión, dependiendo el modelo y la especificación de dicha barra. (Pérez Fernández, 2013)

El diseño de la barra estabilizadora tiene una gama amplia de modelos y tipos, ya que esto depende netamente del vehículo y de su esquema de suspensión. Sin embargo, pese a la variedad de modelos, todos comparten una característica en común, y esta es su posición. Pues

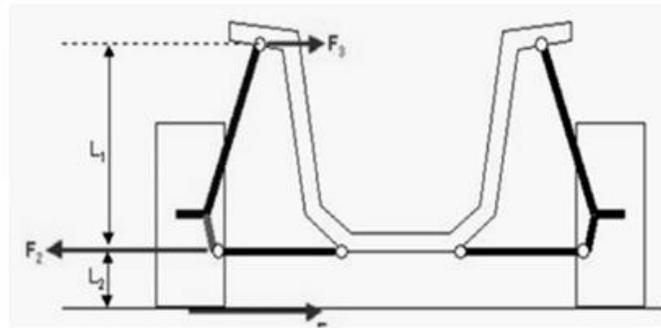
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

van colocadas perpendicularmente respecto al eje longitudinal del vehículo. (Castro Morales, 2021)

Hay muchas fuerzas involucradas y que interactúan sobre la barra estabilizadora, tanto fuerzas horizontales como fuerzas verticales. Sin embargo, las verticales y su sumatoria es igual a cero, por tanto, no son consideradas. En la figura 9 se puede apreciar estas fuerzas involucradas en los análisis posteriores.

Figura 9

Diagrama de fuerzas de la barra estabilizadora



Nota. En la figura 9 se aprecian las fuerzas involucradas en el análisis de una barra estabilizadora respecto al paralelogramo de trabajo. Tomado de Definición y Mejora del proceso productivo de una barra estabilizadora [Figura], por (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2008)

El beneficio real de que ofrece la incorporación de una barra estabilizadora a un sistema de suspensión es el equilibrio de fuerzas que existe en dicho sistema. Pues al ser un elemento de torsión permite la repartición de carga del sistema de fuerzas involucradas en todo el sistema de suspensión, de modo que el comportamiento del vehículo es óptimo y sobre todo seguro debido al buen agarre que adopta debido al balance de fuerzas. (Paredes, K. G. M., Jaramillo, E. R. Á., & Pozo, F., 2022)

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Respecto a la importancia de las características de este elemento, también se debe hablar de su espesor. Mientras mayor sea este, es decir mientras más gruesa sea la barra, existirá una mayor resistencia a la torsión, por ende, menos se inclinará el coche. Esta resistencia también se puede conseguir variando el material de conformación de la barra estabilizadora. Mientras más dureza contenga este material, mayor será su resistencia a la torsión; no obstante, se debe tomar en cuenta también su coeficiente de elasticidad, pues debe ser el adecuado para no partirse y cumplir con la misión de la barra de torsión. (Pérez Fernández, 2013)

Sin embargo, este no es motivo para colocar una barra estabilizadora demasiado gruesa. Pues hay un factor que también interviene y determina muchos aspectos del vehículo, y este es la comodidad del usuario. Pues no se puede sacrificar este aspecto para optimizar las barras de torsión, ya que de ese modo sería impensable manejar un vehículo durante períodos de tiempo prolongado, pues la incomodidad sería de una muy alta intensidad.

Pues además de esto existe otro problema relacionado al espesor de la barra, y es el correcto funcionamiento de los otros elementos que conforman el sistema de suspensión, pues estarían expuestos a una interacción un tanto más agresiva con la barra estabilizadora, debido a la rigidez que ocasiona un alto grosor, y por tanto podrían presentarse uno o varios inconvenientes en el sistema de suspensión del vehículo. (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2008)

En conclusión, la función de la barra estabilizadora es controlar la posible inclinación del vehículo al tomar una curva o cuando existe una discrepancia de recorrido de un neumático respecto al otro. Es aquí cuando este componente entra en acción; en el primer caso, la inclinación obliga a la barra a transferir el peso de la carrocería desde la rueda interna hacia la externa respecto a la curva. Mientras que en el segundo escenario lo que hace la barra estabilizadora es transferir el peso de la masa suspendida de un lado a otro de acuerdo con la diferencia de recorrido de una

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

rueda respecto a la otra en las diferentes instancias de conducción habitual. (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2008)

Cabe destacar la amplia gama de tipos de barras estabilizadoras que existen y cómo estas influyen directamente al esquema de suspensión del coche, sin embargo, hay un factor común en cualquiera de ellas y es que el grosor de la barra será el factor determinante de cuánto resistirá a la torsión esta misma. No obstante, si la rigidez de la barra es muy alta, la llanta de la parte interna del vehículo puede llegar a elevarse en caso de una inclinación pronunciada, más aún si el eje donde va colocada esta misma es un eje de tracción. (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2008)

Figura 10

Barra estabilizadora delantera



Nota. En la figura 10 se aprecia la barra estabilizadora de la suspensión delantera del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010. Tomado de IPAR DESARMADURIA [Figura], por Hyundai, 2007, I.D., S/F, (<https://www.desarmaduriaipar.cl/desarmaduria/repuesto/5363/barra-estabilizadora-delantera-hyundai-elantra-1-6-g4fc-dohc-16-valv-4x2-2006-2007-2008-2009-2010-2011>).

1.1.1.1. Relación entre la flexibilidad de la barra estabilizadora y el balanceo de la carrocería

El balanceo que el vehículo puede adquirir al tomar una curva puede ser de una magnitud importante y por tanto convertirse en un movimiento perjudicial para la estabilidad y equilibrio

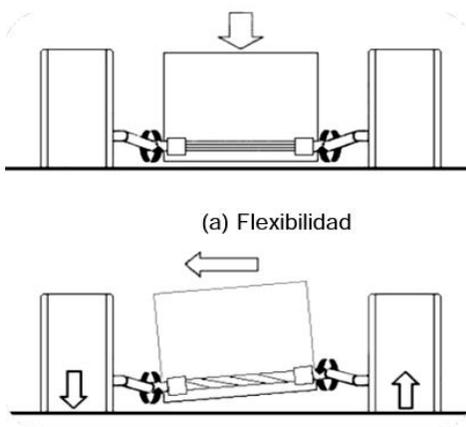
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

dinámico del auto. Este balanceo se controla de diversos métodos, siendo la barra estabilizadora el principal usado.

Se debe controlar adecuadamente las dimensiones, el posicionamiento y el mecanismo de acción de la barra estabilizadora de la suspensión, pues de esta manera se puede regular el comportamiento del vehículo acorde con las necesidades del usuario en base a las prestaciones que ofrece cada tipo de automotor. (Castro Morales, 2021)

Figura 11

Relación entre flexibilidad y balanceo de la barra estabilizadora



Nota. En la figura 11 se aprecia el trabajo que realiza la barra estabilizadora cuando el vehículo se encuentra en marcha. Tomado de Barra Estabilizadora [Figura], por B.H., 2000, (<https://www.km77.com/tecnica/bastidor/estabilizadora/texto.asp>).

Esta relación entre la flexibilidad de la barra estabilizadora y el balanceo de la carrocería trae consigo una serie de factores importantes a tomar en cuenta para que no se vea afectada. Factores de mantenimiento como tal, pues averías en este elemento pueden afectar de manera directa y determinante tanto a la pieza en sí como a su funcionamiento individual y como

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

conjunto de suspensión. En la siguiente sección se detallan las averías y problemas que pueden surgir cuando de la barra estabilizadora se habla. (Correa Quevedo, 2013)

1.1.1.2. Posibles averías en la barra estabilizadora

Es importante mencionar las averías y posibles daños que pueden surgir en la barra estabilizadora y su funcionamiento como tal. Debido a que no solo forman parte de los sistemas básicos del vehículo, sino que son un pilar fundamental dentro del ámbito de la comodidad y sobre todo de la seguridad de los ocupantes de este mismo. Como tal no existen muchas averías que puedan ocurrir sobre la barra estabilizadora, pues su conformado es simple justamente para evitar estos fallos.

Es decir, aunque existan condiciones de manejo extremas, toleradas según el diseño del fabricante, estos elementos van a ser capaces de soportar estos esfuerzos generados. Más aún la barra estabilizadora, pues al ser un elemento de torsión, su material fue incluido tomando en cuenta esta interacción. De este modo, podrá tolerar esfuerzos muy grandes, pues soporta el peso de la carrocería al girar el vehículo, sin temor a una deformación permanente, cabe recalcar que esto no es ley, pero sí un patrón.

Sin embargo, existen. Y estos fallos pueden ser muy simples o pueden ser determinantes, sobre todo en elementos tales como bieletas, tuercas, uniones y pernos. Es por eso por lo que se los detalla a continuación.

- **Rotura de barra**

Como se mencionó previamente, no suelen existir averías durante la vida útil de la barra estabilizadora. Es por esto por lo que el único fallo que puede ocurrir en este elemento como tal, es la rotura. Pues debería existir una condición

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

demasiado desfavorable de manejo o una situación externa a su normal funcionamiento lo cual genere esta rotura.

Factores como golpes, colisiones con otros vehículos, colisiones contra estructuras serían determinantes para que esta condición de rotura se presente. Hablando más específicamente de la rotura en la barra estabilizadora, esta podría ser parcial, o total, dependiendo de qué tan grave fue el factor que generó este daño. (López Donaire, 2021)

- **Holgura en las bieletas**

Esta avería surge más en los componentes de unión de la barra estabilizadora, pues justamente al cumplir el rol de sujeción, pueden existir holguras en estos mismos, más conocidos como juegos. De manera específica con el pasar del tiempo y el rodaje del vehículo, estas piezas pueden ir tomando cierto juego con respecto a su punto de unión. (López Donaire, 2021)

Es por esto por lo que una vez que se detecte esta avería, lo más seguro es reemplazar la pieza, pues quizás presente alguna ligera deformación, y de este modo se evita cualquier percance de mayor magnitud. No obstante, pueden existir ocasiones en las que esta holgura se presente por factores externos, tales como algún golpe de no mucha importancia, el cual haya quitado sujeción a esta pieza y su anclaje. En estos casos lo ideal sería simplemente realizar un nuevo ajuste de estos elementos, verificando antes que no exista un daño considerable el cual pueda afectar a futuro al funcionamiento de estas piezas y sobre todo a la seguridad de los ocupantes del vehículo. (López Donaire, 2021)

Figura 12

Relación entre flexibilidad y balanceo de la barra estabilizadora



Nota. En la figura 12 se aprecia el trabajo que realiza la barra estabilizadora cuando el vehículo se encuentra en marcha. Tomado de Barra Estabilizadora [Fotografía], por L.D., 2021,

(<https://www.actualidadmotor.com/que-es-una-barra-estabilizadora/>).

- **Daño en los soportes de la barra estabilizadora**

Este último fallo como tal no suele ser muy común, pero podría llegar a pasar.

Una vez más cabe recalcar que esta avería únicamente puede surgir a raíz de un defecto de fábrica o porque el vehículo ha sufrido un golpe el cual haya descuadrado partes del sistema de suspensión o inclusive a la carrocería o chasis como tal. (López Donaire, 2021)

De llegarse a presentar este fallo, los soportes suelen ser placas de metal que van sujetas al marco inferior del sistema de suspensión. Por esta misma razón estos soportes suelen ser de carácter más económicos, por lo que su reemplazo sería la única solución, verificando que este fallo no haya traído consigo más averías en otros componentes del

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

sistema, específicamente en la barra estabilizadora y sus bieletas de sujeción. (López Donaire, 2021)

Bieleta de sujeción de la barra estabilizadora

Específicamente el Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010 posee bieletas de sujeción, las cuales están posicionadas de manera vertical y perpendicular a la barra estabilizadora delantera. Su función es la de un terminal, es decir une a la barra con los conjuntos de suspensión en cada lado respectivamente. Esta pieza permite que la barra estabilizadora realice su función de torsión en base al trabajo de amortiguación realizado por los conjuntos muelle-amortiguador o en función del giro del vehículo en curva para mantener su estabilidad y no permitir que los neumáticos se despeguen del suelo. (Talero Cañón, 2015)

Son elementos fundamentales pues en base a ellos la barra estabilizadora realiza su trabajo de manera óptima. Si llegase a haber un fallo, deformación o rotura en estas piezas, la función que realiza la barra estabilizadora se vería afectada pues no habría un punto fijo de unión de esta misma con el conjunto neumático-muelle-amortiguador. (Talero Cañón, 2015)

Figura 13

Bieleta de sujeción de la barra estabilizadora delantera



ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. En la figura 13 se aprecia la bieleta de sujeción que va anclada al chasis y a los extremos de la barra estabilizadora pertenecientes al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Tomado de MotorDoctor [Figura], por MotorDoctor, S/F, (<https://www.motordocor.es/products/2885308-bieleta-de-suspension>).

Brazo de suspensión

El brazo de suspensión es uno de los elementos claves del sistema, pues permite la unión del marco inferior del sistema de suspensión con el nudillo inferior del sujetador acoplado al disco de freno. A su vez, en esta pieza recae gran parte de la magnitud de la fuerza de impacto que absorbe cada conjunto muelle-amortiguador durante el rodaje del vehículo. Este elemento permite también el libre movimiento de los neumáticos sin influir en el marco principal del sistema de suspensión. (Talero Cañón, 2015)

El brazo de control utilizado en el Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010 pertenece a la marca NIPPARTS, tiene una medida de rosca M12x1,25 y de altura constructiva en mm de 86,8. Y su medida cónica principal en mm es de 14,8. (Hyundai, 2010)

Esfuerzos de torsión y fuerzas implicadas

Hibbeler (2005) afirma que *“la torsión es un momento que tiende a torcer un elemento sobre su eje longitudinal. “(p. 185).* Este efecto de torsión es la esencia fundamental del funcionamiento de la barra estabilizadora y la obliga a realizar la transferencia de peso de la parte interior del vehículo a la exterior respecto a la curva. Esto genera una mayor adherencia transversal de la rueda exterior. Sin embargo, la efectividad de esto dependerá de si la rueda que recibe el peso está en óptimas condiciones de soportar esta sobrecarga.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

En caso de que no se cumplan estas condiciones óptimas necesarias, sea por disposición geométrica específica de cada suspensión o por un inadecuado reparto estático de pesos del vehículo, el efecto de la transferencia de peso sería negativa. Esto se traduce en una notoria disminución de la adherencia del neumático a la calzada y, por ende, la fuerza lateral que es capaz de generar disminuirá significativamente. (Hibbeler, 2005)

Ecuación 1

Ecuación general de torsión elástica

$$\tau = \frac{T * \rho}{J}$$

La ecuación permite apreciar una relación entre el par de torsión, la distancia de la fuerza al eje y su momento polar de inercia.

Dónde:

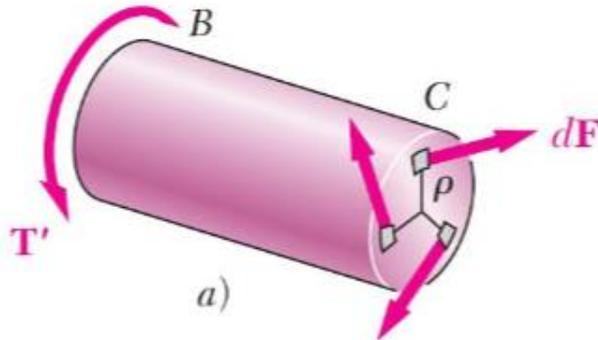
T = Par de torsión de la barra

ρ = Distancia perpendicular de la fuerza con respecto al eje de flecha

J = Momento polar de inercia de la sección transversal de la barra con respecto a su centro

Figura 14

Connotación de la ecuación general de torsión elástica



Nota. La figura 14 ejemplifica cómo es que actúa la torsión en una porción de un eje. Tomado de Mecánica de Materiales [Figura], por (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009)

Ecuación 2

Ecuación de máxima torsión elástica

$$\tau_{max} = \frac{T * c}{J}$$

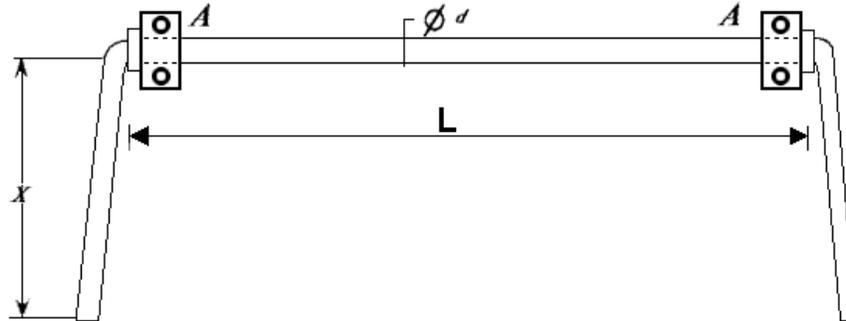
La ecuación permite apreciar una relación entre el par de torsión, la distancia de la fuerza al eje y su momento polar de inercia.

¿Es aplicable la función de torsión máxima en este caso de estudio? La respuesta podría ser si, ya que la barra estabilizadora representa un eje con sección transversal uniforme, sin embargo, sus extremos no están unidos a placas rígidas sólidas, sino que tiene bieletas de sujeción ancladas a cada uno de sus extremos. Esto por lo tanto genera una concentración de esfuerzos distinta para justamente estos puntos de anclaje.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 15

Diagrama simplificado de la barra estabilizadora del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010



Nota. En la figura 15 se aprecia un diagrama simplificado de la barra estabilizadora del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010. Tomado de MotorDoctor [Figura], por MotorDoctor, S/F, (<https://www.motordocor.es/products/2885308-bieleta-de-suspension>).

Por su parte, la fuerza lateral mencionada se refiere a la capacidad de inhibir el deslizamiento del vehículo en el eje donde está la barra estabilizadora. En este caso específico de estudio del Hyundai Elantra 1.6 4DR 2010, esta disminución de la fuerza lateral traería como consecuencia que el automotor aumenta notablemente el riesgo a un subviraje. Esto puesto que la barra estabilizadora analizada es la delantera, en el caso de la parte posterior, el comportamiento sería contrario, es decir, de sobreviraje.

Las interacciones a las cuales está sometida la barra estabilizadora son muy variadas, desde cargas axiales hasta esfuerzos de torsión, pues dependen de varios factores y situaciones. Es por esto que este elemento es fundamental dentro del sistema de suspensión ya que permite controlar y mantener al margen estos esfuerzos, protegiendo a la suspensión en conjunto y al vehículo como

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

tal de cualquier tipo de daño o deformación. Esto a su vez permite brindar y garantizar la seguridad necesaria a los usuarios de los vehículos. (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009)

Es importante mencionar que las fuerzas que actúan en los conjuntos de suspensión son de carácter variable, pues van cambiando conforme el tiempo y el rodaje del vehículo como tal. Además, para el presente estudio las fuerzas implicadas tienen que ver directamente con el mal estado vial de la ciudad de Quito y específicamente con los baches que existen en la mayoría de las vías de circulación urbana. La magnitud de estas fuerzas se detalla a profundidad en el capítulo 3 del presente estudio. (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009)

Cabe destacar que debe existir un equipo de trabajo específico para el diseño de estos elementos y todo lo que esto conlleva. Pues no solo se debe priorizar el diseño en base al cumplimiento del objetivo principal sino también de muchos factores secundarios que intervienen, tales como la seguridad, la comodidad y la efectividad a la hora de implementar estas piezas. Estos factores secundarios dependen netamente del ángulo de inclinación que la barra puede permitir en diversas condiciones de rodaje y manejo. (Pérez Fernández, 2013)

Este ángulo de inclinación se toma en los extremos de la barra estabilizadora cuando la carrocería y los conjuntos de suspensión se inclinan hacia el exterior dependiendo el lado de giro claro está. Previamente en el capítulo uno se mencionó brevemente a las fuerzas que intervienen en la barra estabilizadora y como lo hacen. Tal es así que en la siguiente figura se puede apreciar las principales fuerzas implicadas.

El beneficio real que concede el uso de la barra estabilizadora es el equilibrio y balance de fuerzas en el sistema de suspensión, lo que permite una repartición de carga de manera equitativa tanto para cada conjunto de suspensión como para la barra estabilizadora como tal. Es por esto por

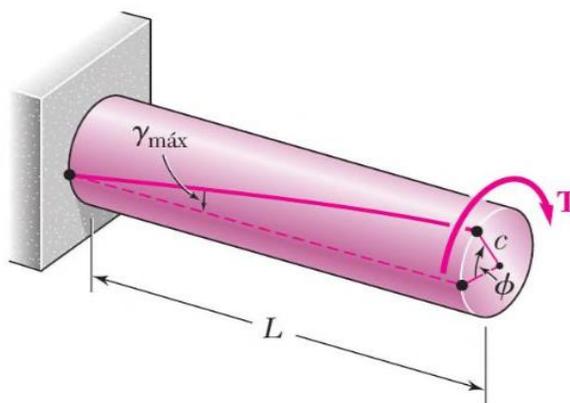
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

lo que se ha malentendido el esfuerzo al cual está sometida la barra y se cree que es bajo compresión y no bajo tensión. Esto se debe a que en varios modelos de vehículos se ha incorporado una serie de graduadores para acercar más los puntos de referencia del esfuerzo hacia el centro del automotor. (Castro Morales, 2021)

En conclusión, se puede adaptar de manera práctica y sencilla una barra estabilizadora a un sistema de suspensión, y por tanto mejorar el control de la tracción que posee el vehículo con la calzada, pues los beneficios serán notables. Es evidente que no se puede adaptar y colocar cualquier barra de torsión, ya que primero se debe realizar un estudio y un análisis exhaustivo de las fuerzas vectoriales que están involucradas en cada modelo de sistema de suspensión, pues dependiendo del objetivo para el cual fue ensamblado el vehículo, estas fuerzas varían en su aplicación y puntos de máximo esfuerzo.

Figura 16

Diagrama de principales fuerzas en una barra de torsión



Nota. La figura 16 permite apreciar las fuerzas, reacciones e interacciones de torsión que se producen un eje/barra. Tomado de Mecánica de Materiales [Figura], por (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009)

Software CAE

La ingeniería asistida por computador (Computer Aided Engineering-CAE), es una herramienta y sobre todo una tecnología que se desarrolló hace algunos años ya, sin embargo, ha ido tomando popularidad y fuerza durante la última década. Existen diversos programas computacionales/software que son especialistas en este ámbito pues llevan integrados y programados consigo una serie de modelos matemáticos los cuales permiten llevar a cabo el modelado de elementos y de este modo poder realizar simulaciones y/o verificaciones para evaluar el posible comportamiento de estos bajo condiciones reales de trabajo. Los softwares que dispongan de esta tecnología son capaces de brindar todas las herramientas necesarias para el diseño, la simulación, validación e inclusive la fabricación de estas piezas. (Vásquez Martínez, 2020)

Esta tecnología como ya se mencionó previamente ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a que brinda aproximaciones bastante realistas. La industria automotriz por su parte ha ahorrado recursos económicos y tiempo ya que permite simular el rendimiento de un elemento sin la necesidad de construirlo y someterlo a pruebas físicas o a su vez modelar un elemento ya creado y evaluar el desempeño de este. Es dentro de este tipo de softwares en los cuáles se llevan a cabo análisis como los de elementos finitos, análisis estructurales, análisis por CFD o análisis térmicos, etc. (Vásquez Martínez, 2020)

Modelado 3D

Si bien es cierto en el ámbito del diseño de elementos de ingeniería asistida por computador es fundamental la escala con la que va a ser replicada la o las piezas, hay un paso

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

previo mucho más importante, el cual es la fabricación tangible del modelo o elemento a ser estudiado. Cabe aclarar que esto aplica cuando se requiere analizar el comportamiento del elemento bajo diversas condiciones de trabajo planteadas. Pues en muchos otros casos el diseño y modelado 3D representan un primer paso para una posterior fabricación tangible de la o las piezas diseñadas. (Correa Quevedo, 2013)

Para el modelado en 3D de la pieza o elemento se emplea lo que se denomina un software CAD (Computer Aided Design), estos programas computacionales vienen con herramientas integradas las cuales permiten replicar el diseño de una pieza en específico en base a las medidas y dimensiones reales, esto debe ser un proceso muy minucioso, pues estas medidas exactas son requeridas de ese modo para posteriormente poder ser procesadas en el software CAD y someter el diseño 3D a diversas pruebas y análisis según las necesidades del estudio. (Castro Morales, 2021)

Simulación SSM

Dentro de toda la gama de softwares computacionales CAD, cada uno existe para un objetivo en específico y cuenta con diferentes herramientas para poder cumplir dicho requerimiento. El software CAM utilizado para la simulación del presente estudio titulado “Análisis dinámico mediante software computacional de la barra estabilizadora delantera de un Hyundai Elantra 1.6 4dr 2010 afectada por los baches en la ciudad de Quito – Ecuador” será Altair SimSolid.

Este software computacional permite analizar el elemento o conjunto de elementos propiamente dicho bajo diversas condiciones de trabajo, sea aplicando fuerzas, sometiendo a estrés y esfuerzos al elemento, entre otras. Estas interacciones pueden ser de carácter variable, lo

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

que permite realizar tantos análisis como sean requeridos para evaluar el comportamiento del conjunto y en base a esto sacar las conclusiones pertinentes. (Correa Quevedo, 2013)

Figura 17

Ejemplo de un modelo 3D analizado en el software SimSolid



Nota. La figura 17 ejemplifica un sólido creado previamente en un software CAD, el cual está siendo analizado mediante el software SimSolid.

Las herramientas de SimSolid son muy variadas en su tipo y en su funcionalidad, no obstante, las principales usadas son las herramientas de conexión (soldaduras, remaches, perno/tuerca, uniones rígidas y deslizantes). Así como sus herramientas de análisis tales como el análisis de propiedades térmicas, con fuerzas dinámicas, estático, modal, entre otros. Esto permite obtener un escenario muy cercano a la realidad en cuanto a aplicación de condiciones de trabajo se trate.

Así también posee muchas ventajas que ofrece este software computacional, la principal de ellas es que simplifica la geometría del modelo 3D como tal. Es decir, permite aplicar análisis y simulaciones sencillas, pues no posee sistema de mallado, lo cual se traduce en un proceso de

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

simulación mucho más ágil en comparación a otros softwares de simulación. Además, garantiza los resultados de dichos análisis en cuestión de minutos o segundos dependiendo cuál haya sido la prueba aplicada. La gran gama de opciones de SimSolid permite obtener resultados de todo tipo, los más utilizados son los resultados de tensión, de deformaciones, de frecuencia, de animación y de carácter modal. Claro está que existen muchos más tipos de resultados, pues como se mencionó previamente estos dependen del análisis o prueba que haya sido aplicada al modelo 3D.

MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

Metodología de la investigación

Enfoque de la investigación

El enfoque que se utilizará en el presente estudio será del tipo cuantitativo. Puesto que se ha presentado un problema de estudio delimitado el cual sigue un proceso definido. A partir de lo anteriormente planteado se desarrolla un marco teórico, del cual deriva una hipótesis. Esta misma tiene como fundamentos toda la recolección previa y el análisis de datos, puesto que estos mismos son medibles. (Townsend, 2020)

Todos los datos obtenidos mediante la simulación que se planea en el presente estudio permiten cuantificar las variables y de este modo establecer conclusiones que validen o descarten la o las hipótesis que han sido planteadas. De este modo se obtiene un análisis exacto en cuanto a los aspectos cuantitativos que están inmersos en esta metodología de investigación.

Método de investigación

El método utilizado en el presente trabajo de titulación será del tipo empírico, más específicamente un método empírico experimental, pues en base a todo el planteamiento se deberá revelar las características fundamentales del objeto de esta investigación. (Townsend, 2020)

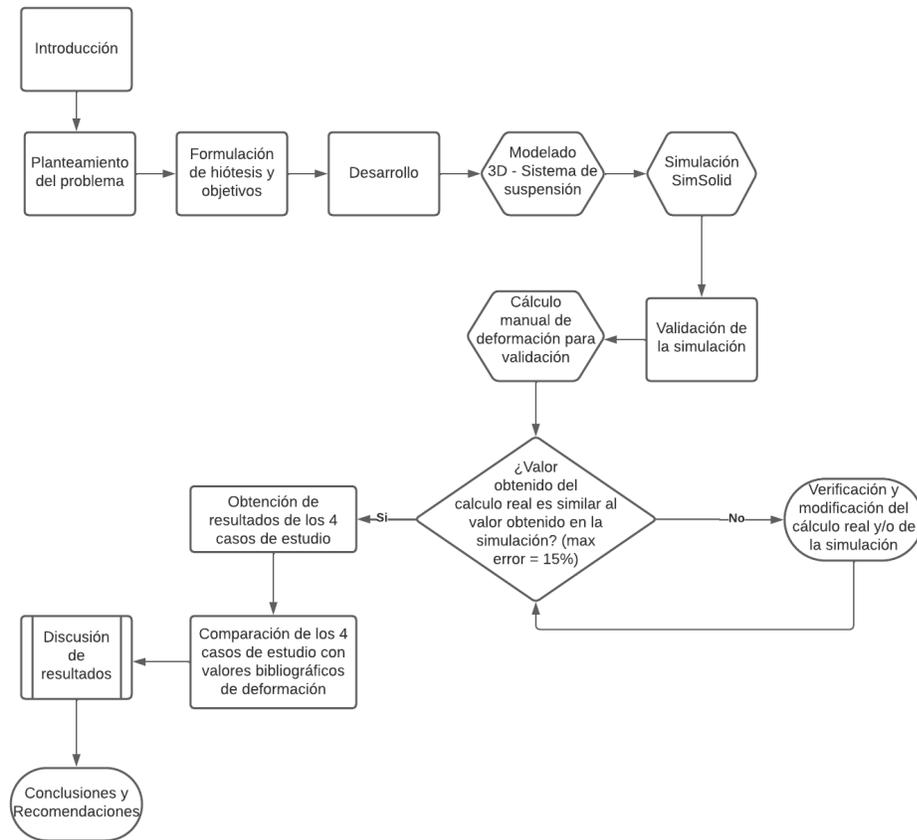
El tema planteado básicamente consta de una simulación mediante un software computacional. Esto valida el método experimental, pues se estaría experimentando con ciertos datos y bajo ciertas condiciones preestablecidas para de este modo comprobar o descartar la o las hipótesis que fueron planteadas.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

En la figura 18 se presenta el proceso de los pasos a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos de la tesis.

Figura 18

Flujograma de pasos realizados para el desarrollo del proyecto



Nota. La figura 18 ejemplifica el proceso realizado en el presente trabajo de titulación para cumplir con los objetivos planteados respetando siempre una metodología correcta y cálculos veraces.

Modelado del sistema de suspensión

En esta sección se realizó el modelado/diseño 3D del sistema de suspensión del vehículo implicado en el presente estudio. Para esta finalidad se utilizó el software computacional CAD “Autodesk Inventor”, el cual permite modelar de manera específica cada componente del sistema de suspensión para su posterior ensamble. El manual de usuario del vehículo Hyundai Elantra sirvió como herramienta adicional para el modelado 3d, pues las medidas y proporciones, en su mayoría, fueron tomadas específicamente del vehículo como tal.

El manual de usuario generaliza el modelo del sistema de suspensión, pues incluye a las generaciones desde el 2006 hasta el 2010. Sin embargo, existen ligeras modificaciones que forman parte de cada modelo. Hablando específicamente del modelo 2010, estos cambios se pueden apreciar tanto en la unión de los brazos de suspensión al marco inferior como en la posición y forma de la barra estabilizadora. Es por esto que a través de fotografías serán evidenciados estos elementos, o en su mayoría, pues existen piezas que no pueden ser identificadas de manera exacta a través de dichas fotografías debido a su posicionamiento y ubicación.

Los elementos fueron dibujados individualmente y ensamblados acordes a los subconjuntos que conforman el sistema de suspensión. A continuación, se detalla cada pieza la cual fue remodelada y diseñada acorde a lo mencionado previamente. Se incluirá una fotografía, de ser posible, del elemento escogido para poder apreciar tanto su imagen real como el diseño realizado en Autodesk Inventor.

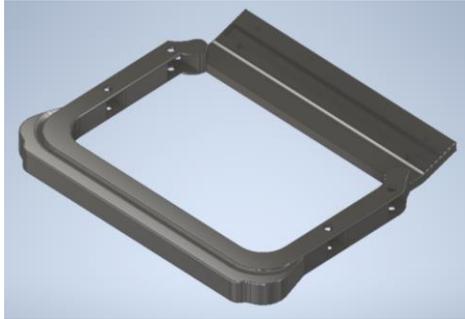
Subconjunto 1: Marco inferior

Esta pieza cumple la función de ser el soporte inferior principal del sistema de suspensión.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 19

Diseño 3d – Marco inferior (pieza)



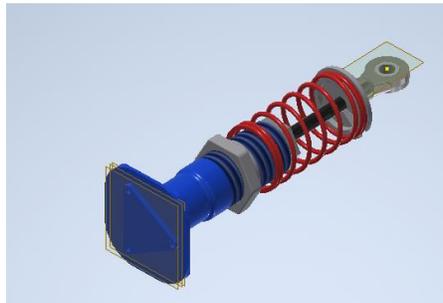
Nota. La figura 19 ejemplifica el marco inferior de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Subconjunto 2: Muelle-amortiguador

Esta pieza cumple la función de absorber las irregularidades del camino.

Figura 20

Diseño 3d – Amortiguador (ensamble)



Nota. La figura 20 ejemplifica el conjunto de muelle-amortiguador de la suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Esta pieza está conformada por 4 subconjuntos:

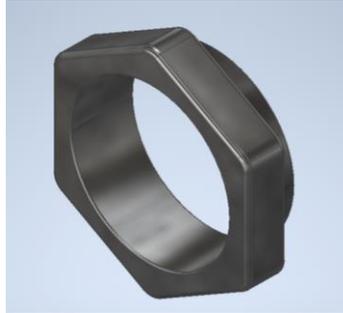
- Tuerca de ajuste del muelle (*pieza*)

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Esta pieza cumple la función de dejar ajustado el muelle perteneciente al amortiguador.

Figura 21

Diseño 3d – Tuerca de ajuste del muelle helicoidal (pieza)

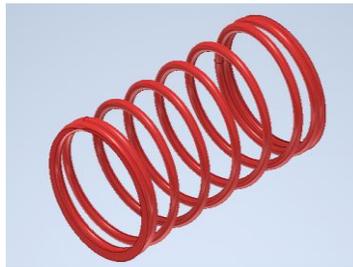


- Muelle helicoidal (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de comprimirse o extenderse en función de las necesidades del conjunto muelle-amortiguador.

Figura 22

Diseño 3d – Muelle helicoidal (pieza)



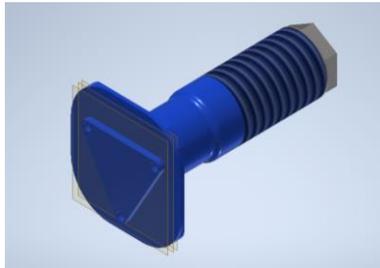
- Cuerpo del amortiguador (ensamble)

Esta pieza es el cuerpo principal del amortiguador del sistema de suspensión.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 23

Diseño 3d – Cuerpo del amortiguador (ensamble)



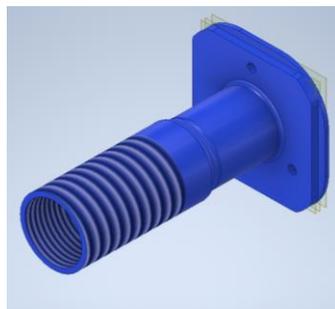
Nota. La figura 23 ejemplifica el cuerpo del amortiguador del sistema de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Esta pieza a su vez está conformada por 2 subconjuntos:

Cuerpo del amortiguador (pieza)

Figura 24

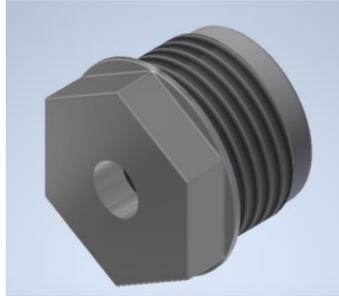
Diseño 3d – Cuerpo del amortiguador (pieza)



Tapa sellante (ensamble)

Figura 25

Diseño 3d – Tapa de sello del cuerpo del amortiguador (ensamble)



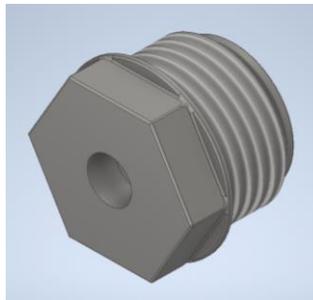
Esta pieza a su vez está conformada por 5 subconjuntos:

Tapas de sello (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de ser la tapa del cuerpo del amortiguador.

Figura 26

Diseño 3d – Tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)



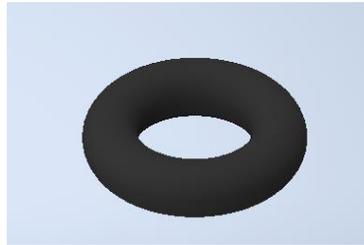
O-ring 1 – O-ring 2 (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de sellar la cubierta de la tapa del amortiguador, asegurando la estanqueidad de los fluidos contenidos.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 27

Diseño 3d – O-ring de la tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)

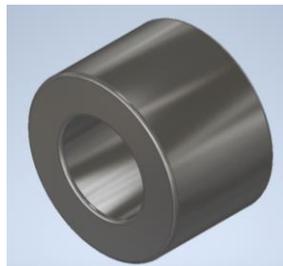


Separador de tapa sellante (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de separar el cuerpo del amortiguador de la tapa de sello.

Figura 28

Diseño 3d – Separador de tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)



Cubierta de tapa sellante (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de ser la cubierta protectora principal de la tapa sellante del amortiguador.

Figura 29

Diseño 3d – Cubierta de la tapa de sello del cuerpo del amortiguador (pieza)



ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

- Puntal del amortiguador (ensamble)

Figura 30

Diseño 3d – Puntal del amortiguador (ensamble)



Esta pieza a su vez está conformada por 5 subconjuntos:

Eje del amortiguador (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de ser eje principal del puntal del amortiguador.

Figura 31

Diseño 3d – Eje del amortiguador (pieza)



Nota. La figura 31 ejemplifica el pasador del eje del amortiguador de la suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

E-clip 1 – E-clip 2 (*pieza*)

Estas piezas cumplen la función de ser asegurar el eje del amortiguador con la conexión inferior.

Figura 32

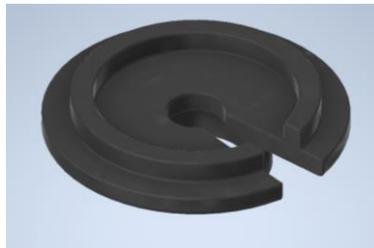
Diseño 3d – E-clip del amortiguador (pieza)



Copa del amortiguador (*pieza*)

Figura 33

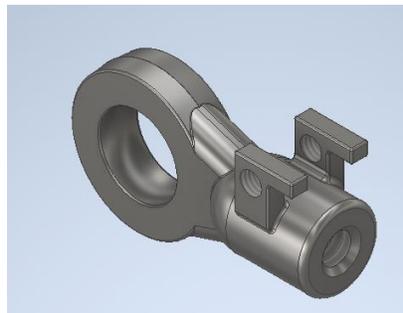
Diseño 3d – Copa del amortiguador (pieza)



Conexión inferior del amortiguador (*pieza*)

Figura 34

Diseño 3d – Conexión inferior del amortiguador



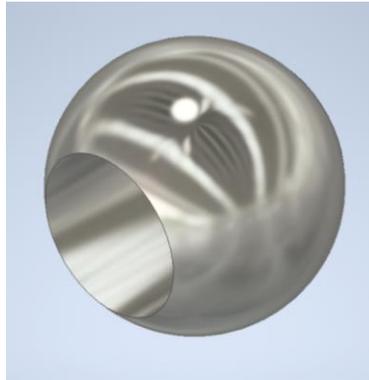
Rodamiento de bola de la base del amortiguador (*pieza*)

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Esta pieza permite que el sistema no friccioné excesivamente y evitar vibraciones y ruido.

Figura 35

Diseño 3d – Rodamiento de bola de la base del amortiguador (pieza)



Subconjunto 3: Brazo inferior de control

Esta pieza cumple la función de dar un rango de movimiento a los amortiguadores sin separarse del marco inferior del sistema de suspensión.

Figura 36

Diseño 3d – Brazo inferior/barra oscilante (ensamble)



Nota. La figura 36 ejemplifica el marco inferior de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Esta pieza a su vez está conformada por 2 elementos:

- Barra oscilante

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Esta pieza cumple la función de unir a los amortiguadores con el marco inferior del sistema de suspensión.

Figura 37

Diseño 3d – Brazo de control (pieza)



- Esfera de rotación (*pieza*)

Esta pieza cumple la función de oscilar y dar libertad de movimiento a los amortiguadores que van anclados a esta misma.

Figura 38

Diseño 3d – Esfera de rotación



Subconjunto 4: Barra estabilizadora

Esta pieza cumple la función de evitar que las llantas se despeguen de la calzada cuando el vehículo toma una curva durante su rodaje.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 39

Diseño 3d – Barra estabilizadora (pieza)



Nota. La figura 38 ejemplifica la barra estabilizadora de la suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Subconjunto 5: Neumáticos

Figura 40

Diseño 3d – Neumático (ensamble)



Nota. La figura 40 ejemplifica el neumático delantero perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010, diseñado en el software CAD “Autodesk Inventor”.

Modelo 3D Final

El modelo final del sistema de suspensión es del tipo ensamble de elementos, en donde cada una de las piezas presentadas previamente fueron unidas en un conjunto de objetos para concretar y construir el ensamble final. El sistema de suspensión será presentado a continuación:

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura

Ensamble del conjunto de suspensión – Autodesk Inventor



Nota. La figura ejemplifica el conjunto de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 en su vista de perspectiva en su fase final de modelado 3D en el software Autodesk Inventor.

Análisis Dinámico

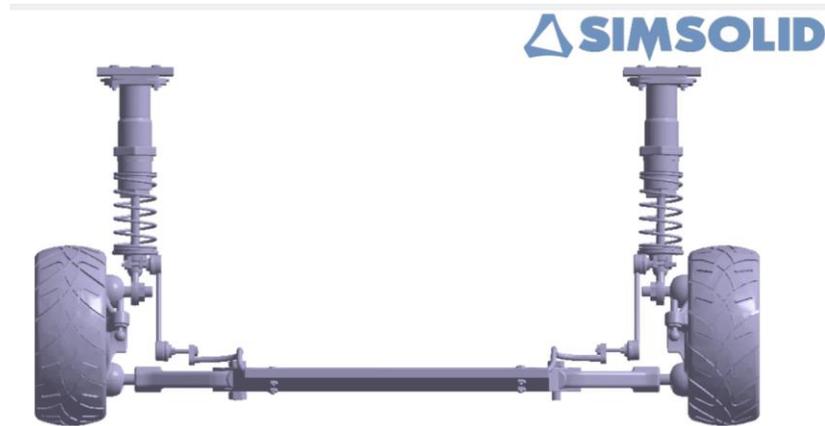
Para esta sección se recurrió al software computacional SimSolid el cual permite realizar diversos análisis y simulaciones sobre una estructura, conjunto de elementos, o piezas individuales como tal. El modelo de la suspensión luego de ser ensamblado a través de Autodesk Inventor fue exportado para ser utilizado en SimSolid. En la figura 41 se aprecia el modelo previo a las simulaciones y análisis de fuerza dinámica que serán aplicados sobre el mismo.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Mas adelante se detalla como fue el proceso de validación de datos, asignación de materiales y de aplicación de fuerzas sobre el conjunto y cómo permitió validar los datos obtenidos mediante estudios similares realizados previamente.

Figura 41

Ensamble del conjunto de suspensión – SimSolid



Nota. La figura 41 ejemplifica el conjunto de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 en su vista frontal en fases previas a la simulación en el software SimSolid.

Uniones y Conexiones

Lo primero que se debe realizar en el software es la validación de todas las piezas y que estas formen un conjunto de piezas como tal. Pues si llegasen a existir puntos donde no estén unidos estos elementos no se podría realizar la simulación, pues la repartición de carga y esfuerzos a través del conjunto no sería uniforme y muy alejado de la realidad, por lo que el software no podría compilar los modelos matemáticos necesarios para realizar el análisis. Esto se conoce como prueba de puntos desconectados, es una herramienta que ofrece SimSolid.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Existen dos tipos de conexiones que pueden ser verificadas y modificadas para evitar posibles errores. Las conexiones regulares son el primer tipo y abarcan todo tipo de unión de piezas y elementos a través del ensamble de estos mismos. Es decir, analiza el comportamiento de cada pieza y su interacción con todo el conjunto. El otro tipo de conexión es conocido como perno/tuerca, y permite analizar justamente puntos de unión de piezas las cuales hayan sido conectadas a través de pernos y tuercas, pues son puntos dentro del ensamble que también pueden generar errores de conexión.

Específicamente en el presente estudio se obtuvieron los siguientes datos en cuanto a conexiones se trata:

Tabla 1

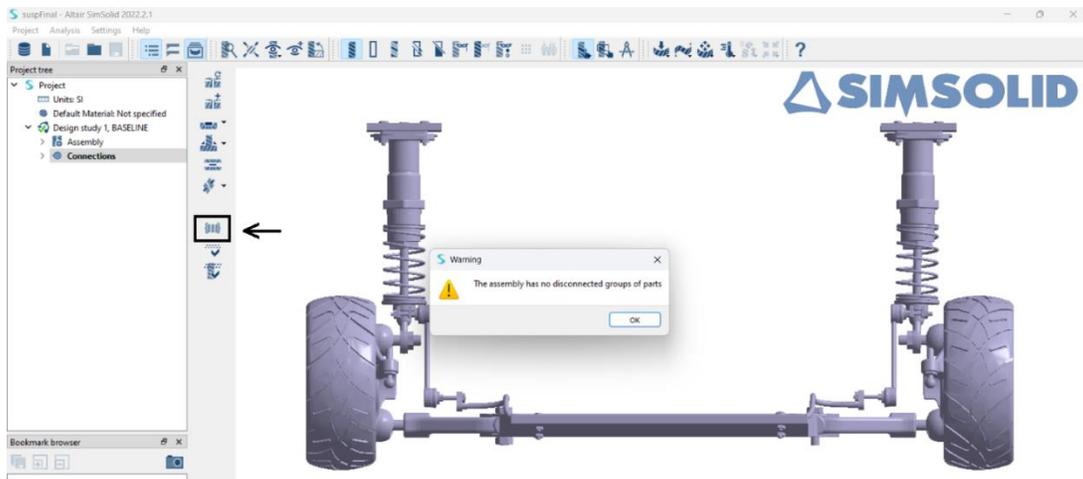
Conexiones totales en el ensamble del conjunto de suspensión delantero del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010

Conexiones regulares	259
Conexiones perno/tuerca	64

El modelo una vez que fue importado del software Inventor fue sometido a una prueba de contacto, para de este modo verificar puntos sin unión dentro de este ensamble de piezas. A continuación, se aprecia detalladamente dicho proceso.

Figura 42

Prueba de desconexión – SimSolid



Nota. La figura 42 ejemplifica el resultado satisfactorio de la prueba de puntos desconectados en el conjunto de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 en el software SimSolid.

Asignación de materiales

Esta sección es sumamente importante para un posterior análisis, sea cual sea, pues dependiendo el material aplicado a cada pieza, se obtendrán distintos valores resultantes una vez que el modelo sea sometido a los diversos análisis y pruebas. Es evidente que cada material tiene distintas propiedades y características, las cuales le otorgan al material un comportamiento único a las diferentes condiciones de trabajo que sean necesarias.

A continuación, se expone la tabla de materiales que fueron asignados a los distintos elementos que conforman el sistema de suspensión delantera perteneciente al vehículo Hyundai Elantra HDR 1.6 2010. Cabe recalcar que los materiales utilizados y asignados a las distintas piezas fueron fundamentados en base a lo que el manual de fabricación del vehículo indica y en base a la investigación bibliográfica realizada.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Tabla 2

Materiales del sistema de suspensión delantero Hyundai Elantra HDR 1.6 2010

PIEZA/ELEMENTO	MATERIAL ASIGNADO
Marco inferior	AISI 4340 - Normalizado
Brazo inf. de suspensión	AISI 4340 - Normalizado
Barra estabilizadora	AISI 5160
Bieletas de sujeción	AISI 1020 - Normalizado
Amortiguadores	AISI 4340 - Normalizado
Eje del amortiguador	AISI 1040 - Normalizado
Muelles helicoidales	AISI 1040 - Normalizado
Conjunto-neumáticos	Aleación de magnesio AZ31B – Conformado en caliente
Soportes superiores de amortiguadores	AISI 4340 - Normalizado
Conexión inf. del amortiguador.	AISI 1040 - Normalizado
Perno ANSI	AISI 1020 - Normalizado
Tuerca ANSI	AISI 1020 - Normalizado

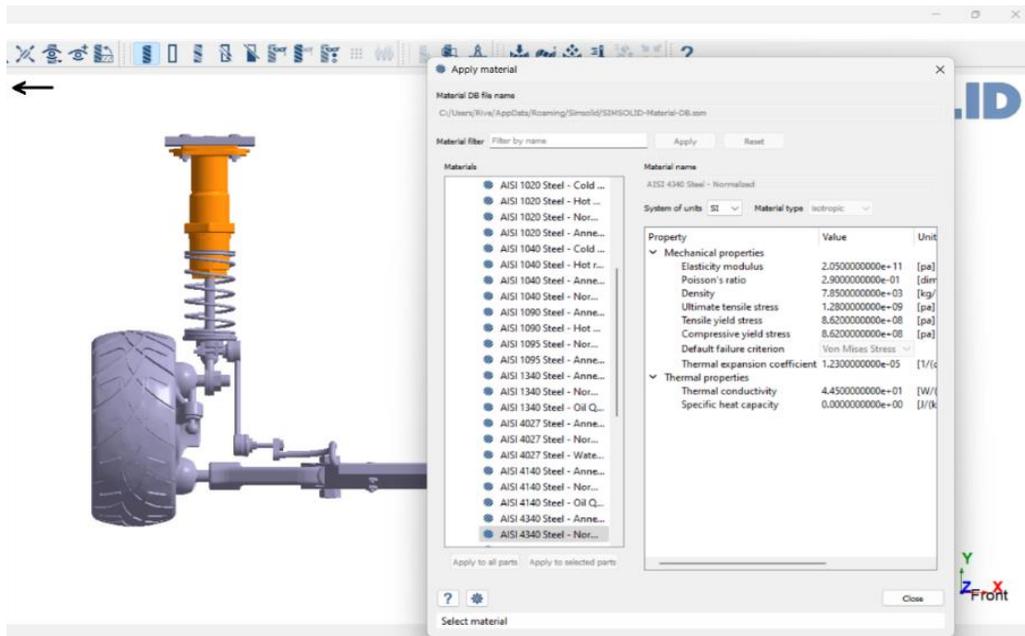
Nota. En la tabla 2 se muestran los materiales asignados a cada pieza y elemento que conforman el sistema de suspensión delantera perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Cabe recalcar que la asignación de material debe ser para cada uno de los elementos que conformen el diseño 3D, pues dependiendo de esto se obtendrán diferentes valores de deformación, de deformación, etc. Y mientras más acertados sean los materiales implementados a cada pieza, se obtendrá una mayor exactitud en los resultados de la simulación. Y en base a esto se podrán obtener datos verídicos que puedan ser tabulados y posteriormente analizados con una adecuada fundamentación. (Chávez Santibáñez & Martínez Mira, 2008)

Figura 43

Designación de material para un elemento del conjunto de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010



Nota. La figura 43 ejemplifica cómo asignar correctamente material a una pieza o elemento perteneciente al sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

Carga/fuerza utilizada

Para esta sección es imperativo obtener la magnitud aproximada de la fuerza que se transmite cuando el vehículo está trabajando/rodando bajo las diversas condiciones del asfalto.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Esta fuerza permitirá analizar la interacción de esta y de todo el sistema/conjunto de suspensión, obteniendo valores de deformación, de deformación, de estrés y esfuerzo, los cuales serán implementados en la validación y análisis de datos.

Existen diversas condiciones de trabajo para el sistema de suspensión, sin embargo, las de mayor relevancia son las de curva, de frenado y de situación de bache. Sea el tipo de análisis que sea debe cumplir con la condición de que la fuerza aplicada debe ir entre el neumático y la calzada, pues la fuerza que absorbe el neumático y todo el sistema de suspensión es una reacción a la relación que hay entre la profundidad del hueco y la velocidad a la que el objeto, el neumático como tal, cae en el bache. (Martín Temprano, 2016)

En el presente estudio se utilizarán las cargas mostradas en la tabla 4 las cuales fueron extraídas del estudio de titulación “*Diseño y fabricación de manguetas traseras para prototipo Fórmula Student*” (p. 80), con lo cual se obtiene fundamentación para las posteriores comparativas y validación de datos resultantes.

Tabla 3

Magnitud de la fuerza implicada en cada condición de trabajo para el conjunto de suspensión

	Rueda interior			Rueda exterior		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
Bache	-	6800	6800	-	6800	6800
Curva	-	1785	592,5	-	6286,5	3820.5
Frenada	3982,5	-	1896,75	3982,5	-	1896,75

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. La tabla 4 ejemplifica las distintas magnitudes en Newtons de las fuerzas implicadas en las condiciones de trabajo más utilizadas para un sistema de suspensión. Tomado de *Diseño y fabricación de manguetas traseras para prototipo Fórmula Student* (p. 80), por C. Martín, 2016, Escuela de ingenierías industriales - UDV.

Para la fuerza/carga que será aplicada se recurrirá al análisis estructural lineal que ofrece SimSolid, el cual tiene una amplia gama de configuraciones y modificaciones con el objetivo de satisfacer los requerimientos de investigación. Para el caso específico del presente estudio la fuerza aplicada será variable, es decir existirán X casos de prueba. Para cada uno de ellos el proceso de aplicación de carga, que se explicará más adelante, será el mismo. Lo único que cambiará será la magnitud de dicha fuerza en cada caso de simulación.

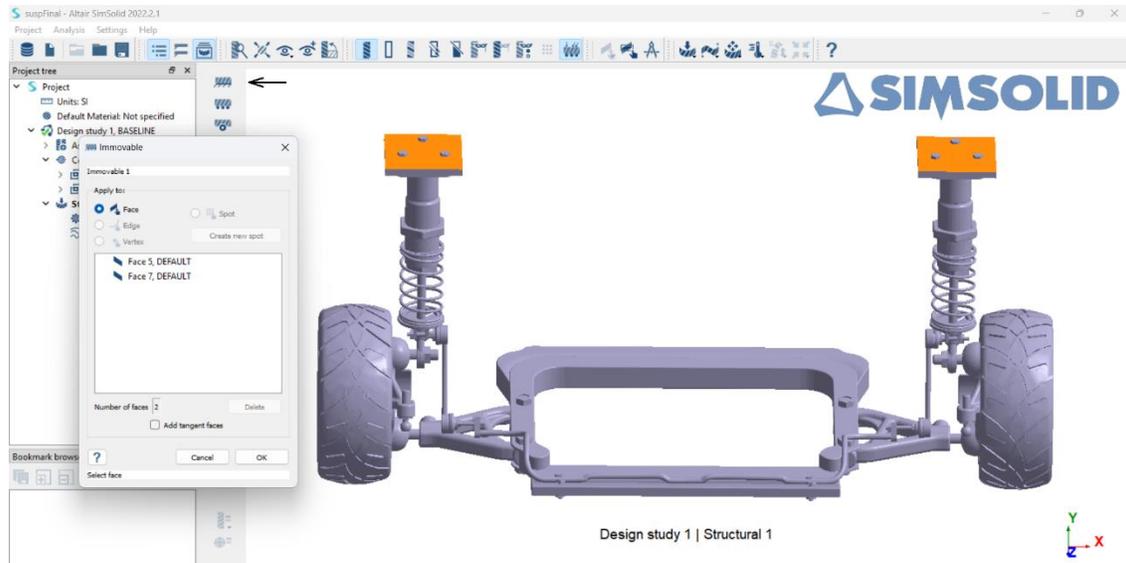
Una vez que se seleccionó el tipo de estudio se debe completar ciertos pasos previos a la simulación como tal, los cuales se detallan a continuación.

1. Puntos fijos/inamovibles

Para el presente estudio se estableció los puntos de fijación a los terminales superiores donde van anclados los amortiguadores al chasis del vehículo. En la figura 44 se puede apreciar lo mencionado anteriormente.

Figura 44

Designación de los soportes inamovibles del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 en SimSolid



Nota. En la figura 44 se aprecia los elementos seleccionados para ser las piezas inamovibles durante la simulación de carga aplicada al sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6

Estos elementos son fijados como piezas inamovibles pues en el caso real del vehículo los amortiguadores van anclados en su parte superior al chasis del vehículo, por lo que realmente gran parte sino es todo el movimiento sucede en la sección inferior de los amortiguadores como tal.

2. Fuerza/Carga aplicada

Ahora hablando específicamente de la carga que será aplicada al conjunto de suspensión, esta misma estará ubicada entre el neumático y el suelo. Esto debido a la fuerza de reacción que se detalló al inicio de la sección 3.3.3 cuyo valor es de 6800 Newtons. El bache representa una caída libre para el neumático, lo cual trae como consecuencia una interacción directa entre la

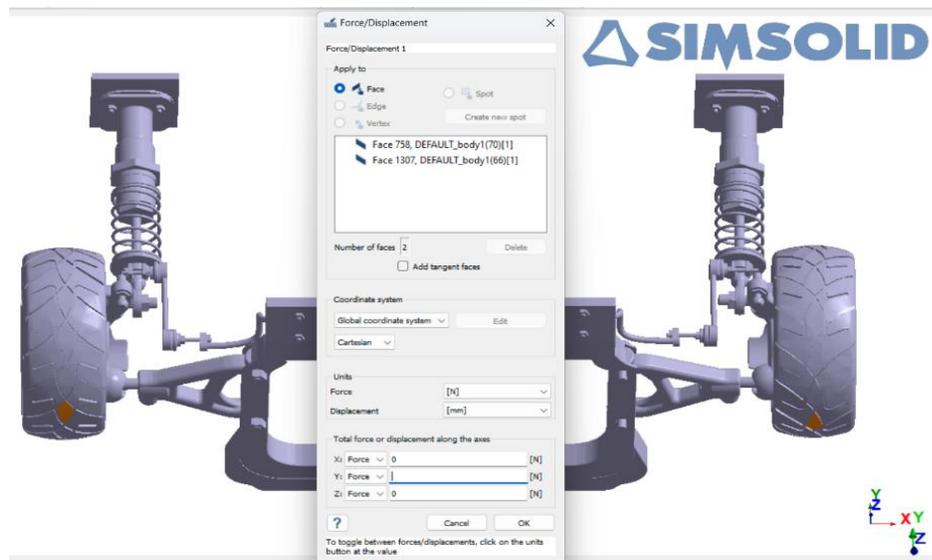
ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

calzada y la llanta, pues el objeto que golpea o que está en contacto con el suelo es el neumático directamente, y la fuerza que se transmite a todo el conjunto de suspensión tiene como primer punto de transmisión a la llanta como tal.

En la figura 45 se puede apreciar la ubicación exacta de la carga que será aplicada al conjunto de suspensión. Cabe recalcar que cada caso de estudio será analizado individualmente.

Figura 45

Ubicación de la carga que será aplicada al sistema de suspensión debido a un bache



Nota. En la figura 45 se aprecia la ubicación exacta de la fuerza/carga que será aplicada para cada caso de estudio durante la simulación al conjunto de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6.

Es necesario detallar que la fuerza aplicada en el presente caso de estudio es una fuerza en el eje Y del plano de coordenadas, pues es una fuerza paralela a la fuerza de gravedad, ya que netamente involucra un elemento “rígido” en una interacción de caída libre. Es por esta razón que la fuerza no es aplicada en los otros ejes pertenecientes al plano.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Una vez que se realizan todos los pasos previos para la simulación solo queda aplicar a cada caso de prueba. A continuación, se presenta detalladamente cada caso de fuerza aplicada, que para el presente serán cuatro.

Cabe recalcar que para la posterior comparación de resultados no se realizará una simulación a condiciones normales de trabajo, pues se tiene valores bibliográficos específicos de la deformación tolerada por la barra estabilizadora, por lo que con la simulación en condiciones extremas es suficiente.

Ecuaciones y cálculos necesarios para la validación de la simulación

En esta sección se verificará que la simulación sea correcta en sus datos resultantes, pues en base a esta se realizará la comparación de resultados más adelante. Para esta finalidad se recurrirá al cálculo de la deformación de la barra estabilizadora. Esto ayudará a comprobar que la simulación es verídica y correcta. Cabe mencionar que los datos utilizados son correspondientes al diseño en escala del sistema de suspensión.

Para esto se utilizará el valor de la deformación, el cual debe ser calculado y para ello su fórmula se expresa a continuación:

Formula 3

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

Tomado de *Diseño de chasis monoplaza de competición para Formula Student*, por (Guzmán Terrón D., 2020)

δ : deformación

ε : deformación unitaria

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

L: longitud inicial de la barra

Sin embargo, es necesario primero determinar el valor de la deformación unitaria mediante la ley de Hooke:

Formula 4

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Dónde:

E: módulo de elasticidad

ε : deformación unitaria

σ : esfuerzo unitario

Para esto se debe calcular primero el valor del esfuerzo de flexión

Formula 5

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

Tomado de *Modelado de ensayos a paneles de fibra de carbono para la estructura de un prototipo estilo formula*, por (Martínez, E., Ramírez, E. I., Ruiz, O., & Jacobo, V. H, 2018)

..

Dónde:

σ : esfuerzo de flexión de la barra estabilizadora

M: momento máximo de flexión

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

c: distancia del centroide al punto de aplicación de fuerza

I: Momento polar de inercia de la sección transversal

Sin embargo, para este cálculo es necesario primero realizar el cálculo del momento flector, el cual se realiza a partir del diagrama de cuerpo libre del elemento analizado, la realización de diagrama de fuerzas y diagrama de momentos. Eso será presentado en la sección 4.1.

- a. Cálculo de las reacciones de los apoyos de la barra estabilizadora mediante sumatoria de fuerzas y momentos.

$$(\downarrow +) \sum F_y = 0$$

$$(\leftarrow \uparrow +) \sum M_A = 0$$

- b. Cálculo del momento flector máximo mediante diagrama de cuerpo libre y diagrama de fuerzas y momentos.
- c. Cálculo del esfuerzo de flexión de la barra estabilizadora utilizando la fórmula 5.

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

- d. Cálculo de la deformación unitaria de la barra estabilizadora utilizando la fórmula 4.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Despejando:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

- e. Cálculo de la deformación en milímetros empleando la fórmula 3.

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

Despejando:

$$\delta = \varepsilon * L$$

- f. Finalmente se realiza el cálculo del porcentaje de error respecto al valor teórico (simulación) con el valor real (calculado).

$$Error = \frac{valor_{teorico} - valor_{real}}{valor_{real}} * 100$$

Tomado de *CFD simulation model and experimental study to implement a new flowrate formula for a rounded broad crested weir considering the end depth as control section. Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, por (Muhsun, S. S., Al-Hashimi, S. A. M., & Al-Osmy, S. A. T., 2020)

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En la presente sección se analizarán detalladamente los resultados obtenidos en el capítulo tercero en base a los cuales se realizará una comparativa con datos obtenidos a través de la revisión bibliográfica. A continuación, se detalla cada uno de los casos de estudio con sus diferentes pruebas realizadas en cada uno de ellos.

Validación de la simulación

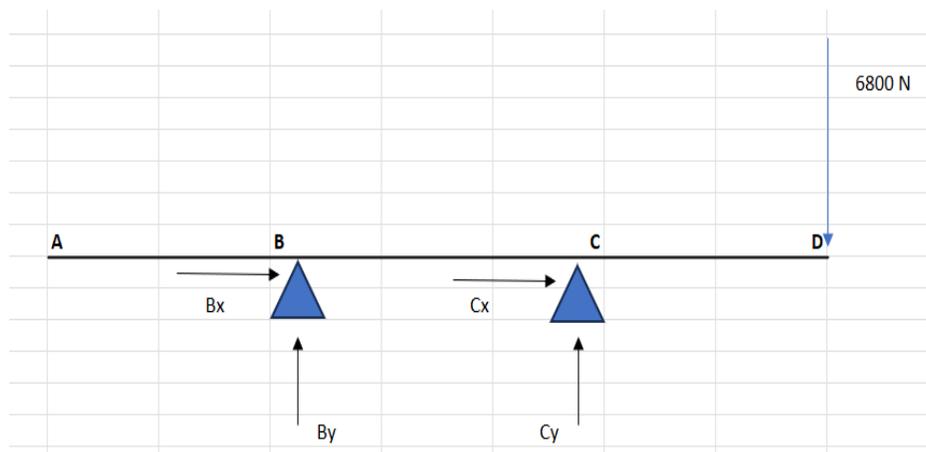
En la sección 3.3.3 se introdujo a los cálculos y fórmulas que serán necesarios para la validación de la simulación, a continuación se presentan los resultados de estos:

- Cálculo de las reacciones de los apoyos de la barra estabilizadora mediante sumatoria de fuerzas y momentos.

Para esto es necesario realizar el diagrama de cuerpo libre de la barra estabilizadora.

Figura 46

Diagrama de cuerpo libre de la barra estabilizadora sometida a una fuerza de bache



ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Nota. En la figura 46 se aprecia la ubicación exacta de la fuerza/carga que será aplicada para en la barra estabilizadora y las reacciones de los apoyos fijo del marco inferior del sistema de suspensión.

Entonces:

$$(\downarrow +) \sum F_y = 0$$

$$B_y + C_y - 6800 = 0$$

$$B_y = 6800 - C_y \quad (1)$$

$$(\leftarrow \uparrow +) \sum M_A = 0$$

$$(B_y * 0.4 +) + (C_y * 0.9) - (6800 * 1.3) = 0$$

$$0.4B_y + 0.9C_y - 8840 = 0$$

$$B_y + \frac{0.9}{0.4} C_y - \frac{8840}{0.4} = 0$$

$$B_y + 2.25C_y = 22100 \quad (2)$$

(2) en (1)

$$22100 - 2.25C_y = 6800 - C_y$$

$$C_y = 12240 \text{ N}$$

\therefore

$$B_y = 6800 - C_y$$

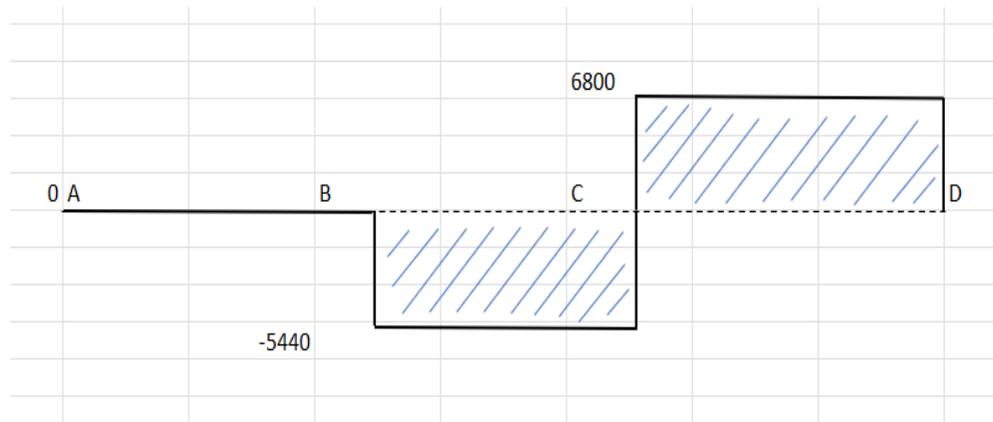
$$B_y = -5440 \text{ N}$$

- b. Cálculo del momento flector máximo mediante diagrama de cuerpo libre y diagrama de fuerzas y momentos.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 47

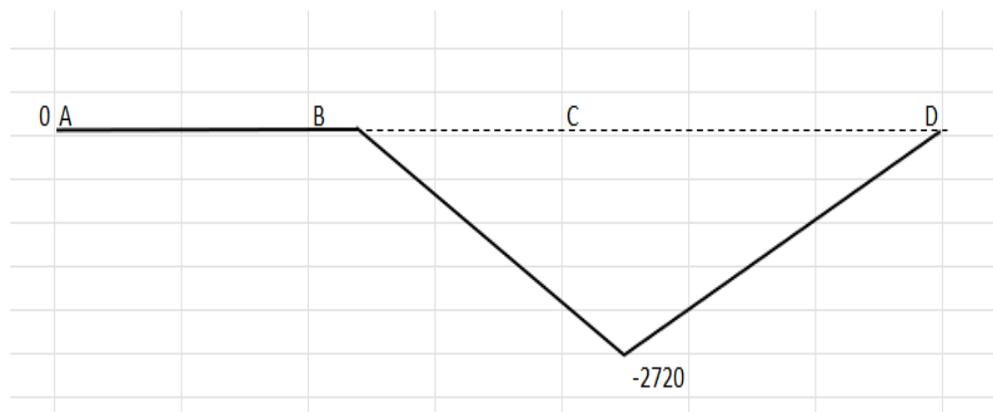
Diagrama de fuerzas de la barra estabilizadora sometida a fuerza de bache



Nota. En la figura 47 se aprecia la distribución de las fuerzas y como se representan estas en el plano cartesiano de trabajo. Las áreas de las figuras formadas entre los tramos BC Y CD serán los puntos de partida para la realización del diagrama de momentos.

Figura 48

Diagrama de momentos de la barra estabilizadora sometida a fuerza de bache



Nota. En la figura 48 se aprecia la distribución de los momentos y como se representan estos en el plano cartesiano de trabajo. El momento máximo encontrado está justo en el punto C. Donde indica un valor negativo, sin embargo, el momento máximo flector viene dado con valor absoluto. Tomado de (Autor, 2023).

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Por tanto el momento máximo encontrado en el estudio es de:

$$M_{max} = |M|$$

$$M_{max} = |-2720|$$

$$M_{max} = 2720 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- c. Cálculo del esfuerzo de flexión de la barra estabilizadora utilizando la fórmula 5.

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

$$\sigma = \frac{2720 * 0.01}{\frac{\pi * (0.01^4)}{4}}$$

$$\sigma = 3.463211562 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

- d. Cálculo de la deformación unitaria de la barra estabilizadora utilizando la fórmula 4.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

El módulo de elasticidad para el acero AISI 5160 es de 190 GPa.

$$\varepsilon = \frac{3.463211562 \times 10^9 \text{ Pa}}{1.9 \times 10^{11} \text{ Pa}}$$

∴

$$\varepsilon = 0.0182274$$

- e. Cálculo de la deformación en milímetros empleando la fórmula 3.

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

Despejando:

$$\delta = \varepsilon * L$$

$$\delta = 0.0182274 * L$$

La longitud inicial de la barra estabilizadora es de: 1.3 metros.

$$\delta = 0.0182274 * 1.3 \text{ m}$$

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

$$\delta = 0.023695 \text{ m}$$

Por lo tanto, la deformación calculada en milímetros es de:

$$\delta = 23.7 \text{ mm}$$

Finalmente, como se mencionó en la sección 3.3.3 se realizará el cálculo del porcentaje de error respecto al valor teórico (simulación) con el valor real (calculado). El cálculo es presentado a continuación:

$$Error = \frac{def_{teorica} - def_{real}}{def_{real}} * 100$$

Para el cálculo del porcentaje de error, se utilizó una carga de 6800 N, tanto para el cálculo del valor real como el valor teórico (simulación). En la simulación el valor de la carga que será presentada más adelante refleja un valor de 25.95 milímetros. Por lo tanto:

$$Error = \frac{25.95 \text{ mm} - 23.7 \text{ mm}}{23.7 \text{ mm}} * 100$$
$$Error = 9.49 \%$$

Cabe recalcar que se hizo el cálculo del porcentaje de error para 2 casos de estudio más y de este modo darle mayor veracidad a la simulación realizada en el presente trabajo de titulación. Los valores de estos porcentajes de error serán presentados en la sección 5.1.

Cabe destacar también que para los diversos casos de estudio de la simulación se utilizan los valores de deformación acorde a la coloración que SimSolid arrojó, pues básicamente la simulación tiene como finalidad determinar en donde y en que magnitud se presentan los esfuerzos en la barra estabilizadora.

Caso de estudio 1

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Caso de estudio 1

Para esta primera prueba se utilizará la siguiente configuración:

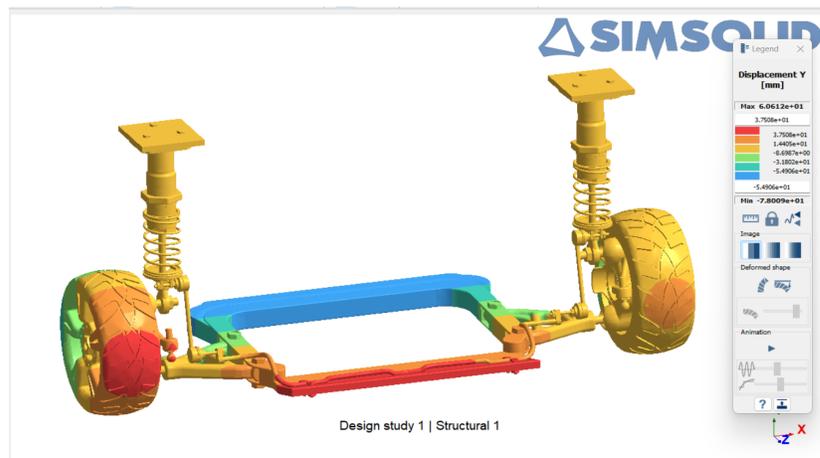
- **Fuerza (en Newtons):** 6800
- **Análisis requerido:** deformación total del conjunto diseñado

Resultado del análisis 1: deformación total del conjunto en el eje Y

En este análisis se pretende evaluar el comportamiento, en el eje Y del plano, de todo el sistema de suspensión como un conjunto global y medir su deformación, en milímetros, a causa de los frecuentes impactos que soporta dicho conjunto cuando entra en contacto con un bache. En la figura se puede apreciar los sectores del sistema de suspensión que sufren en mayor magnitud estas fuerzas.

Figura 49

Resultado del 1er caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y



Nota. En la figura 49 se aprecia el resultado del análisis No. 1 de deformación en el eje Y del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6 para el caso de estudio #1.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Se puede apreciar que en base a la escala de colores se puede clasificar la magnitud de la deformación en cada sector o elemento del diseño 3D del sistema de suspensión.

En la figura 49 se aprecia que existe una coloración tanto naranja como roja en el sector que abarca a la barra estabilizadora. Los valores de deformación obtenidos en base a esta coloración son de:

- **Máx Deformación = 25.95 mm**

En base a estos valores antes mencionados se realizará una comparativa en la sección 5.3. Cabe recalcar que los valores base para la comparación representan la deformación tolerada en el eje de las ordenadas para todas las piezas y/o elementos del sistema de suspensión.

Caso de estudio 2

Caso de estudio 2

Para esta segunda prueba se utilizará la siguiente configuración:

Fuerza (en Newtons): 6500

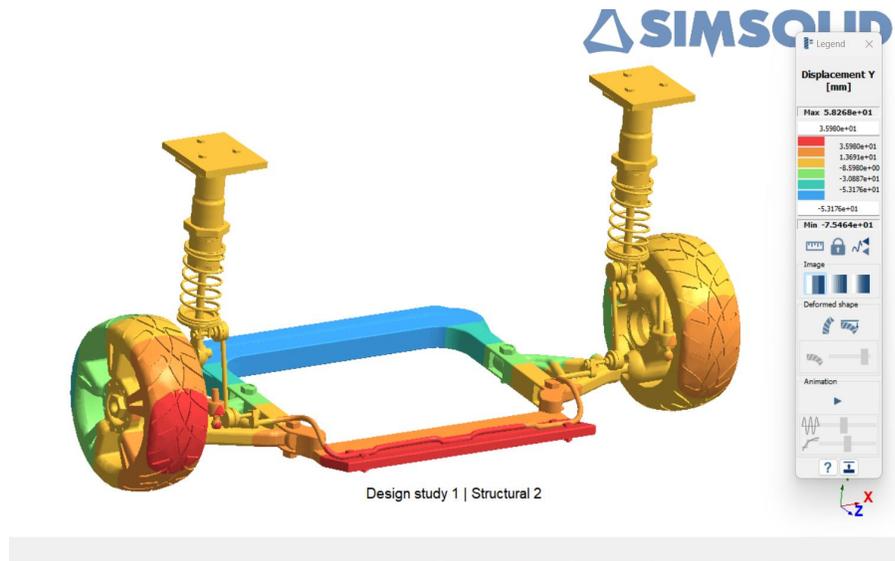
Análisis requerido: deformación total del conjunto diseñado

Resultado del análisis 2: deformación total del conjunto

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 51

Resultado del 2so caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y



Nota. En la figura 51 se aprecia el resultado del análisis No. 2 de deformación en el eje Y del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6.

Se puede apreciar que en base a la escala de colores se puede clasificar la magnitud de la deformación en cada sector o elemento del diseño 3D del sistema de suspensión.

En la figura 51 se aprecia que existe una coloración tanto naranja como roja en el sector que abarca a la barra estabilizadora. Los valores de deformación obtenidos en base a esta coloración son de:

- **Max Deformación = 24.83 mm**

En base a estos valores antes mencionados se realizará una comparativa en la sección 5.5. Cabe recalcar que los valores base para la comparación representan la deformación tolerada en el eje de las ordenadas para todas las piezas y/o elementos del sistema de suspensión.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Caso de estudio 3

Caso de estudio 3

Para esta tercera prueba se utilizará la siguiente configuración:

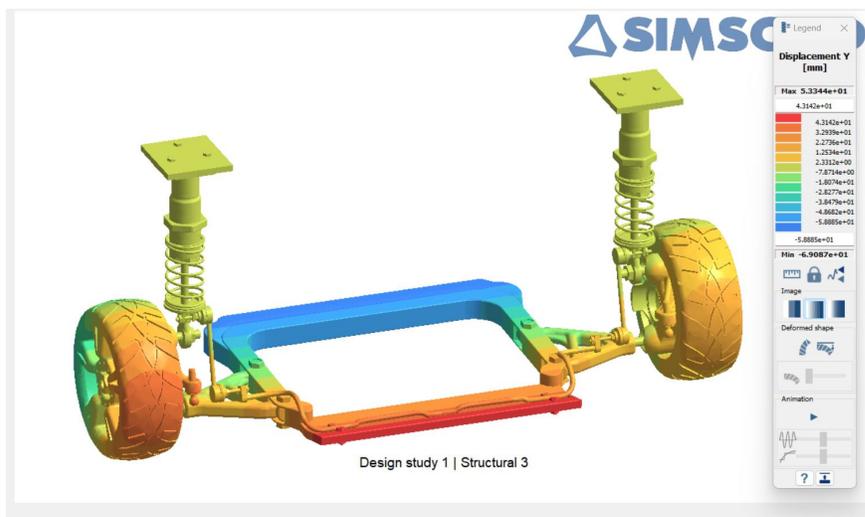
Fuerza (en Newtons): 7100

Análisis requerido: deformación total del conjunto diseñado

Resultado del análisis 3: deformación total del conjunto

Figura 52

Resultado del 3er caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y



Nota. En la figura 52 se aprecia el resultado del análisis No. 3 de deformación en el eje Y del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6.

Se puede apreciar que en base a la escala de colores se puede clasificar la magnitud de la deformación en cada sector o elemento del diseño 3D del sistema de suspensión.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

En la figura 52 se aprecia que existe una coloración tanto naranja como roja en el sector que abarca a la barra estabilizadora. Los valores de deformación obtenidos en base a esta coloración son de:

- **Max Deformación = 27.83 mm**

En base a estos valores antes mencionados se realizará una comparativa en la sección 5.6. Cabe recalcar que los valores base para la comparación representan la deformación tolerada en el eje de las ordenadas para todas las piezas y/o elementos del sistema de suspensión.

Caso de estudio 4

Caso de estudio 4

Para esta cuarta prueba se utilizará la siguiente configuración:

Fuerza (en Newtons): 7300

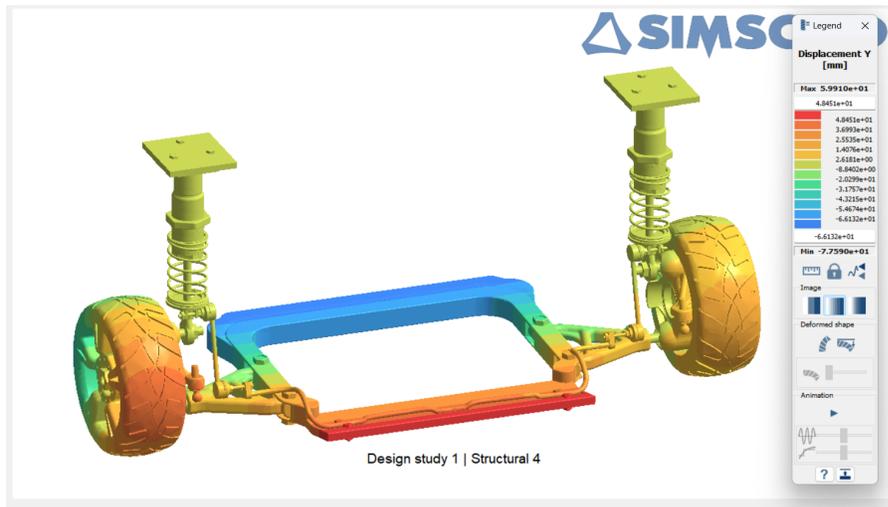
Análisis requerido: deformación total del conjunto diseñado

Resultado del análisis 4: deformación total del conjunto

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 50

Resultado del 4to caso de estudio – prueba de deformación en el eje Y



Nota. En la figura 50 se aprecia el resultado del análisis No. 4 de deformación en el eje Y del sistema de suspensión del Hyundai Elantra HDR 1.6.

En los resultados obtenidos de la simulación del segundo caso de estudio se puede apreciar el comportamiento de deformación en el eje Y del plano de coordenadas, en milímetros, de cada uno de los elementos del sistema de suspensión respecto a la interacción con las fuerzas de impacto a causa de los baches de la calzada de la ciudad de Quito.

Se puede apreciar que en base a la escala de colores se puede clasificar la magnitud de la deformación en cada sector o elemento del diseño 3D del sistema de suspensión.

En la figura 50 se aprecia que existe una coloración tanto naranja oscura como naranja medio en el sector que abarca a la barra estabilizadora. Los valores de deformación obtenidos en base a esta coloración son de:

- **Max Deformación = 31.26 mm**

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

En base a estos valores antes mencionados se realizará una comparativa en la sección 5.4. Cabe recalcar que los valores base para la comparación representan la deformación tolerada en el eje de las ordenadas para todas las piezas y/o elementos del sistema de suspensión.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Validación de la simulación

En la sección 4.1 se realizó una validación del valor de la deformación de manera empírica utilizando la teoría de esfuerzos y deformaciones, el valor que se obtuvo de la deformación para un valor de fuerza de 6800 fue de:

$$\delta = 23.7 \text{ mm}$$

También se realizó el cálculo del porcentaje de error entre el valor obtenido mediante cálculos en la sección 4.1 y el valor obtenido en la simulaciones de los distintos casos de estudio. Una vez realizado el cálculo, los valores resultante para los porcentaje de error se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4

Tabla de porcentajes de error en cuanto a valores de deformación respecto a la carga aplicada

Carga aplicada (N)	Valor Real de deformación (Cálculo) (mm)	Valor teórico de deformación (Simulación) (mm)	Porcentaje de error (%)
6500	22.65	24.83	9.49
6800	23.70	25.95	9.63

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

7100	24.74	27.83	12.49
------	-------	-------	-------

De este modo queda convalidada la veracidad de la simulación pues los valores de porcentaje de error no exceden el 15%, por tanto es confiable para posteriores cálculos y comparativas. Es decir, se puede proseguir a la comparación de resultados en cuanto a deformación se refiere.

Datos bibliográficos utilizados para la comparación de resultados

Los datos que servirán como guía para las posteriores comparativas serán fundamentados en esta sección pues es necesario contrastar los resultados obtenidos en la simulación con una medida ya establecida en base a la ciencia o a algún estudio científico realizado previamente.

Es necesario aclarar que existen diversos factores de medición, sin embargo, los que se utilizarán en el presente estudio son:

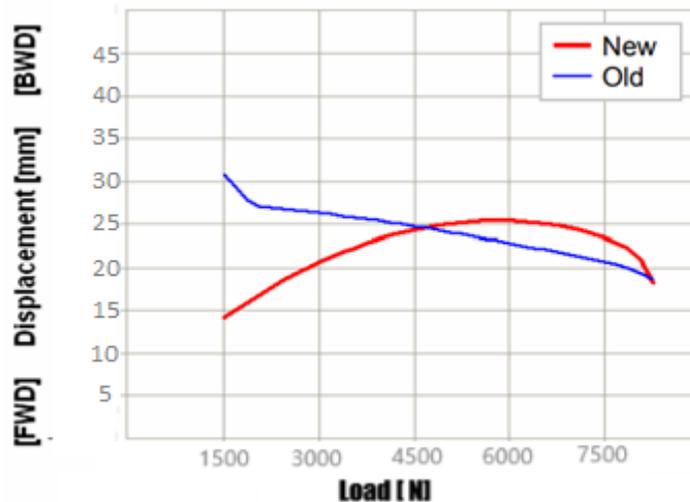
- Desplazamiento/deformación total en el eje Y[mm] en base al golpe de rueda debido a X factor (bache)

Los distintos valores obtenidos una vez realizadas las pruebas de simulación serán comparados con los valores expuestos en la siguiente tabla:

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Figura 53

Deformación del sistema de suspensión bajo condiciones de carga producida por baches



Nota. La figura 53 permite apreciar la deformación tolerada, en milímetros, del sistema de suspensión bajo condición de trabajo con baches respecto al golpe de rueda cuando impacta con dichos baches. Tomado de *The Suspension of the Newly Developed Hyundai ELANTRA* (p. 6), por (Ko, Park, Cho, & Lee, 2006), SAE International.

Cabe destacar que para el presente caso de investigación el sistema de suspensión debido a su año de fabricación y ensamblaje se lo considerará como antiguo, por lo que la línea de tendencia de la figura 53 a utilizar será la de color azul. Los valores normales de deformación suelen estar entre los 20mm y 30mm. De este modo los valores a utilizar en la comparación de resultados serán los adecuados.

Caso de estudio 1

Análisis de deformación total del conjunto (Carga utilizada = 6800 N)

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Tabla 5

Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 1er caso de estudio

Carga aplicada [N]	Valor permitido de deformación [mm]	Valor obtenido de deformación– simulación [mm]
6800	22-23	25.95

Se puede apreciar en la tabla 5 que los valores de deformación permitidos para un valor de carga de 6800 newtons son entre los 22 y 23 milímetros. Como resultado de la simulación del primer caso de estudio el valor obtenido fue de 25.95 milímetros de deformación. A simple vista este valor claramente está fuera del rango de valores permitidos para la deformación general de la barra estabilizadora del sistema de suspensión del vehículo Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

Caso de estudio 2

Análisis de deformación total del conjunto (Carga utilizada = 6500 N)

Tabla 6

Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 3er caso de estudio

Carga aplicada [N]	Valor permitido de deformación [mm]	Valor obtenido de deformación– simulación [mm]
6500	22.9-23.70	24.83

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Se puede apreciar en la tabla 6 que los valores de deformación permitidos para un valor de carga de 6500 newtons son entre los 22.9 y 23.5 milímetros. Pues mientras menor es la carga, mayor cantidad de deformación es tolerada por el sistema. Como resultado de la simulación del tercer caso de estudio el valor obtenido fue de 24.83 milímetros de deformación. A simple vista este valor excede ligeramente el rango de valores permitidos para la deformación general de la barra estabilizadora del sistema de suspensión del vehículo Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

Caso de estudio 3

Análisis de deformación total del conjunto (Carga utilizada = 7100 N)

Tabla 7

Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión –4to caso de estudio

Carga aplicada [N]	Valor permitido de deformación [mm]	Valor obtenido de deformación– simulación [mm]
7100	21.6-22.25	27.83

Se puede apreciar en la tabla 7 que los valores de deformación permitidos para un valor de carga de 7100 newtons van desde los 21.6 hasta los 22.25 milímetros. Pues mientras mayor es la carga, menor cantidad de deformación es tolerada por el sistema y sobre todo por la barra estabilizadora como tal. Como resultado de la simulación del cuarto caso de estudio el valor obtenido fue de 27.83 milímetros de deformación. A simple vista este valor excede de manera considerable el rango de valores permitidos para la deformación general de la barra estabilizadora del sistema de suspensión del vehículo Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

Caso de estudio 4

de deformación total del conjunto (Carga utilizada = 7300 N)

Tabla 8

Tabla comparativa de valores de deformación general del sistema de suspensión – 2do caso de estudio

Carga aplicada [N]	Valor permitido de deformación [mm]	Valor obtenido de deformación– simulación [mm]
7300	20.9-21.5	31.26

Se puede apreciar en la tabla 8 que los valores de deformación permitidos para un valor de carga de 7300 newtons son entre los 20.9 y 21.5 milímetros. Pues a mayor fuerza, menor cantidad de deformación tolerada por el sistema. Como resultado de la simulación del segundo caso de estudio el valor obtenido fue de 31.26 milímetros de deformación. A simple vista este valor claramente excede en bastante magnitud el rango de valores permitidos para la deformación general de la barra estabilizadora del sistema de suspensión del vehículo Hyundai Elantra HDR 1.6 2010.

El aumento en la magnitud de la deformación se debe al incremento de la fuerza de impacto aplicada en comparación con el primer caso de estudio, en el cual la magnitud de la fuerza era

CONCLUSIONES

- Se puede concluir con los resultados de la simulación que la barra estabilizadora perteneciente al sistema de suspensión delantera en condiciones de trabajo extremas como son los baches en las vías de circulación de la ciudad de Quito sufre ligeramente demás, pues los valores de deformación normales permitidos para esta pieza oscilan entre los 15 y 20 milímetros para un valor de fuerza de 6800 Newtons (fuerza que el bache genera en el auto), mientras que la simulación arrojó valores que oscilan entre los 21.7 y los 25 milímetros, evidenciando un valor excedido del rango normal permitido.
- En cuanto a los casos de estudio de las distintas simulaciones se puede concluir que la coloración naranja oscura y roja indicada en la figura 49 en la sección 4.2 es un indicativo que esa zona está sujeta a deformación/deformaciones estructurales relativamente altas en comparación a otras partes del sistema de suspensión. La barra estabilizadora es capaz de soportar el valor de deformación correspondiente a los 6500 newtons aplicados como carga debido a los baches. El desfase es de alrededor de 0.90 milímetros, tomando en cuenta el valor obtenido en la simulación de 24.83 milímetros en comparación al valor de deformación permitido de 23.70 milímetros, es por esto que la barra no sufriría en mayor magnitud en este caso de estudio. El alto nivel de deformación indica que la carga aplicada puede ser realmente riesgosa para la barra estabilizadora, pues podría ser una deformación irreversible, inclusive llegando a la rotura de esta. Esto implicaría el reemplazo de la pieza y posibles deformaciones en otros sectores del conjunto de suspensión. A parte de significar un riesgo implícito para los usuarios del vehículo.

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

- Se determinó también en base a las simulaciones realizadas que las irregularidades y desperfectos de las calles de la ciudad de Quito, específicamente los baches y huecos si tienen un efecto negativo sobre la mayoría de los elementos que componen el sistema de suspensión. Se pudo corroborar que la fuerza absorbida por el neumático al momento de impactar con un hueco no solo distribuye su carga hacia los muelles y amortiguadores, sino que también generan interacciones riesgosas en los demás elementos del sistema de suspensión los cuales no fueron fabricados ni dispuestos para soportar dichas cargas y esfuerzos.
- Se llegó a la conclusión que el diseño en tres dimensiones del sistema de suspensión delantero perteneciente al Hyundai Elantra HDR 1.6 2010 fue elaborado de manera óptima, pues al exportar el modelo de Autodesk Inventor a Altair SimSolid no presentó errores de conexión ni puntos de unión sueltos.

RECOMENDACIONES

- Para el diseño en tres dimensiones se recomienda que en trabajos futuros las medidas que vayan a ser utilizadas y escaladas sean tomadas de manera física, y si es posible recurrir a herramientas más exactas a la hora de la medición para obtener valores exactos y sobre todo veraces al ciento por ciento. De este modo se evitarían posibles resultados incorrectos. Incluso de ser posible se puede acudir al manual del fabricante el cual cuenta con las respectivas cotas y medidas que también son exactas.
- En lo que respecta a la simulación en Altair SimSolid se recomienda ubicar muy bien los puntos de aplicación de carga en el modelo tridimensional y ubicar bien las direcciones en las cuales se aplican dichas cargas, pues en base a esto el comportamiento resultante del conjunto de suspensión irá variando. Esto con el fin de evitar posibles errores de simulación y resultados erróneos. Así mismo se debe establecer de manera adecuada la magnitud las cargas aplicadas ya que de igual forma influirá en el comportamiento del modelo 3D sujeto a estudio de simulación.
- De ser posible utilizar otro software computacional para realizar las simulaciones de carga en el modelo tridimensional del sistema de suspensión, de este modo se puede observar si el comportamiento de la barra estabilizadora es similar al resultante en Altair SimSolid o que variaciones presenta en dichos resultados.
- Es recomendable realizar numerosos casos de estudio de simulación, es decir, variando la carga que será aplicada en el conjunto de suspensión pues de este modo se obtendrá una mayor cantidad de datos resultantes con los cuales se puede corroborar de mejor manera cualquier tipo de comparativa que se esté realizando o validación de estos mismos datos.

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Esto también con el objetivo de evitar posibles errores en las pruebas ejecutadas y así evitar resultados alejados de la realidad mejorando la fiabilidad del estudio.

- Finalmente se sugiere variar las variables de estudio analizando no solo el comportamiento de la barra estabilizadora sino de todo el conjunto de suspensión frente a condiciones de trabajo complejas como son los baches de las calles, esto con el fin de verificar como afectaría al desempeño general del sistema de suspensión y así plantear posibles soluciones a las posibles complicaciones que podrían surgir en la vida real basándose en los resultados de las simulaciones del software computacional utilizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bastar, S. G. (2019). Metodología de la investigación.
2. Garcia, J. M. J. (2022). Sistema de monitoreo de vibraciones para el análisis dinámico de suspensiones automotrices.
3. Carabias-Acosta, E. (2022). Metodología experimental para la identificación de parámetros de suspensión en vehículos automóviles.
4. Murcia, J. F., Ardila, A. N., & Barrera-Zapata, R. (2020). Piezas de la suspensión del automóvil la rótula/BUJE/extremo de la biela/barra estabilizadora del brazo de control de enlace. *Revista ION*, 33(1), 47-56.
5. Townsend, J. (2020). Taller de dirección de tesis - *Portal dedicado a investigar los elementos constitutivos y su discusión en el sentido de rigor científico de un trabajo de tesis*. Consultado el [01-11-2022]. Disponible en:
<https://www.thesisworkshop.com>
6. Paredes, K. G. M., Jaramillo, E. R. Á., & Pozo, F. (2022). Evaluación de los sistemas de suspensión de un vehículo tipo Sedan. *Polo del Conocimiento*, 7(11), 261-275.
7. Salazar Mora, M. A. (2018). Diseño mediante optimización paramétrica de la barra estabilizadora de un vehículo de carreras prototipo.
8. *Muhsun, S. S., Al-Hashimi, S. A. M., & Al-Osmy, S. A. T. (2020). CFD simulation model and experimental study to implement a new flowrate formula for a rounded broad crested weir considering the end depth as control section. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 8(2), 809-820.*

ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

9. López D., D. (2021). Barra estabilizadora: qué es, cómo funciona y averías. *ActualidadMotor*. Consultado el [01-noviembre-2022]. Disponible en:
<https://www.actualidadmotor.com/que-es-una-barra-estabilizadora/>
10. Masaquiza-Yanzapanta, Á. G., Ballesteros-López, J. G., Miranda-Reyes, O. V., & Rocha-Hoyos, J. C. (2021). Estudio de características e innovaciones tecnológicas del amortiguador de sistema de suspensión para vehículos. *Dominio de las Ciencias*, 7(1), 702-721.
11. Zambrano, R., & Edison, C. (2022). Afectaciones de la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito por precipitaciones en el periodo 2010-2019 (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
12. Hibbeler, R. C. (2005). *Mechanics of materials*. Pearson Educación.
13. Abdelkareem, M. A., Xu, L., Ali, M. K. A., Elagouz, A., Mi, J., Guo, S., ... & Zuo, L. (2018). Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review. *Applied energy*, 229, 672-699.
14. Jara Morales, L. M., & Rojas Herrera, B. F. (2021). Análisis metodológico de la frecuencia de suspensión, según la torsión de sus elementos.
15. Escobar, A. A. H., Rodríguez, M. P. R., López, B. M. P., Ganchozo, B. I., Gómez, A. J. Q., & Ponce, L. A. M. (2018). Metodología de la investigación científica (Vol. 15). 3Ciencias.
16. Dieterich, H. (2021). Nueva guía para la investigación científica. Grupo Editor Orfila Valentini.
17. Abraham, C. S., & Mira, S. M. (2020) Estudio del acero utilizado en una barra estabilizadora automotriz (Doctoral dissertation).

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

18. Martínez, E., Ramírez, E. I., Ruiz, O., & Jacobo, V. H. Modelado de ensayos a paneles de fibra de carbono para la estructura de un prototipo estilo formula.
19. Vásquez Martínez, J. L. (2020). *Diseño asistido por computador y construcción de la carrocería de una moto eléctrica*. (Tesis de Pregrado). Repositorio Universidad Autónoma de Bucaramanga.
<https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/13417>
20. Vega, W. H., Llanes-Cedeño, E. A., Molina, J. V., & Rocha-Hoyos, J. C. (2018). Revisión de las Características de Modelado y Optimización para el Diseño del Sistema de Suspensión Macpherson. *Información tecnológica*, 29(6), 221-234.
21. Correa Quevedo, J. F. (2013). Simulación dinámica de la suspensión de una fórmula SAE (Bachelor's thesis, Quito, 2013.).
22. Castro Gaibor, C. J., & Velasco Navas, J. P. (2018). Análisis, diseño y construcción de un sistema informático basado en aplicación móvil y geolocalización para el registro de baches en las vías de la ciudad de Quito (Bachelor's thesis).
23. Guzmán Terrón, D. (2020). Diseño de chasis monoplaza de competición para Formula Student.

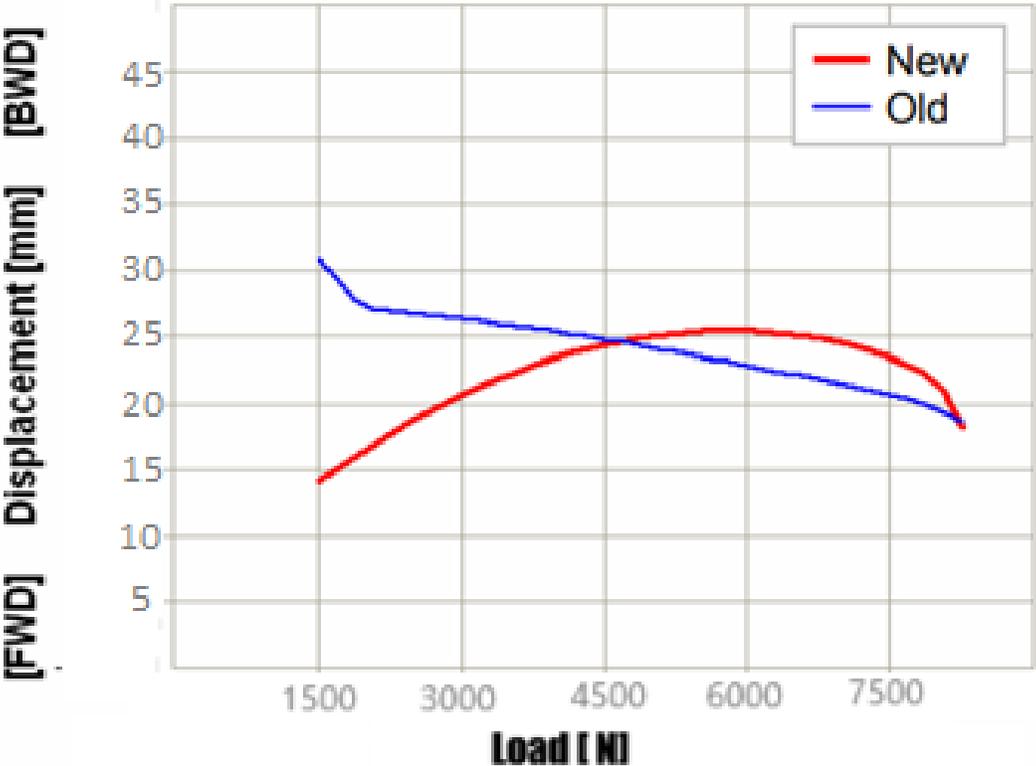
ANEXOS

Anexo-A

Líneas de tendencia de deformación permitida para la barra estabilizadora de un Hyundai Elantra

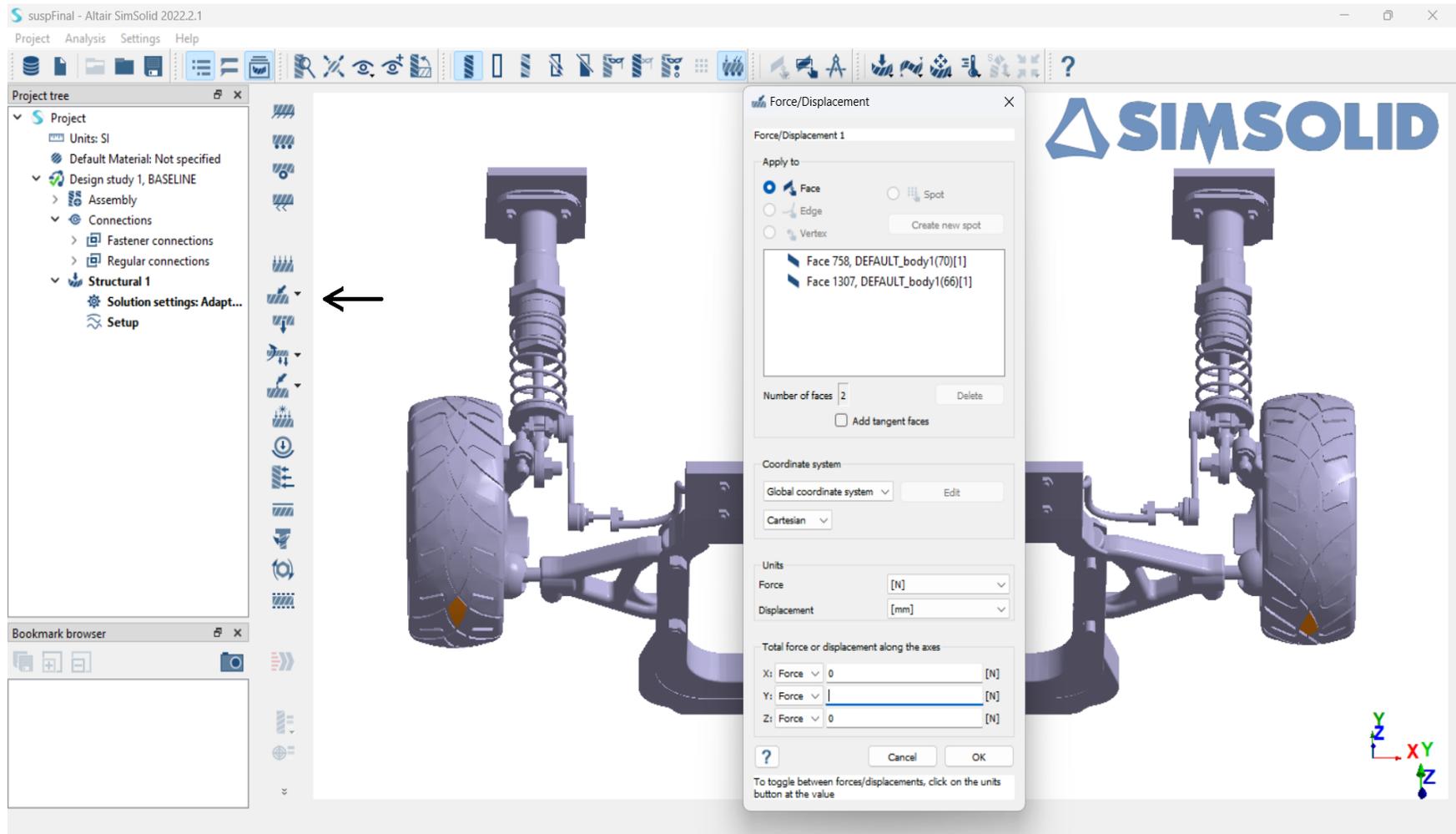
(Gráfica Deformación (mm) vs. Carga (N))

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA



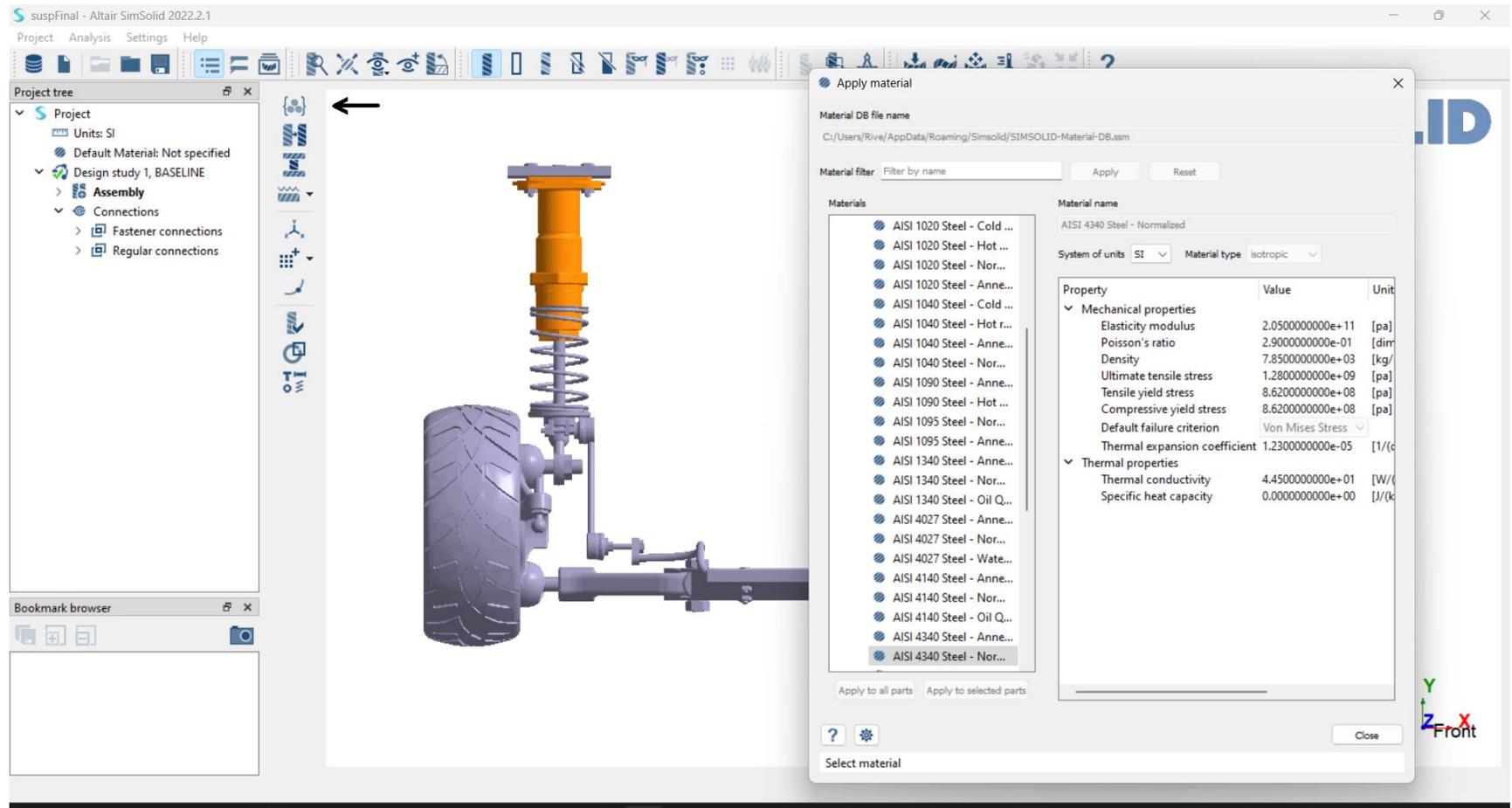
Anexo-B

Ubicación de la fuerza en el sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L debido a un bache en las vías



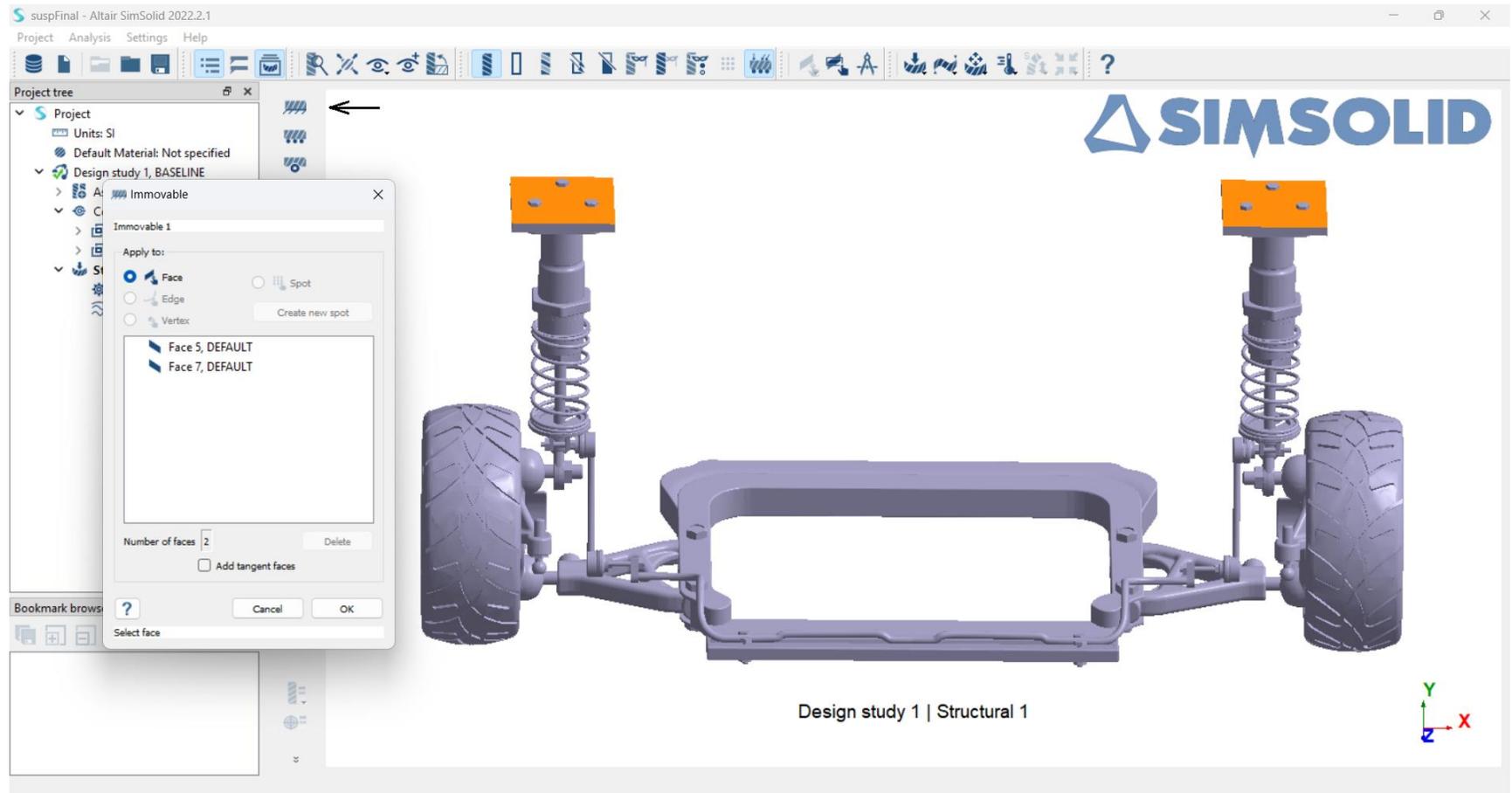
Anexo-C

Aplicación de materiales específicos en las diversas partes que conforman el sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L



Anexo-D

Ubicación de partes fijas en el sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L para las posteriores simulaciones y casos de estudio

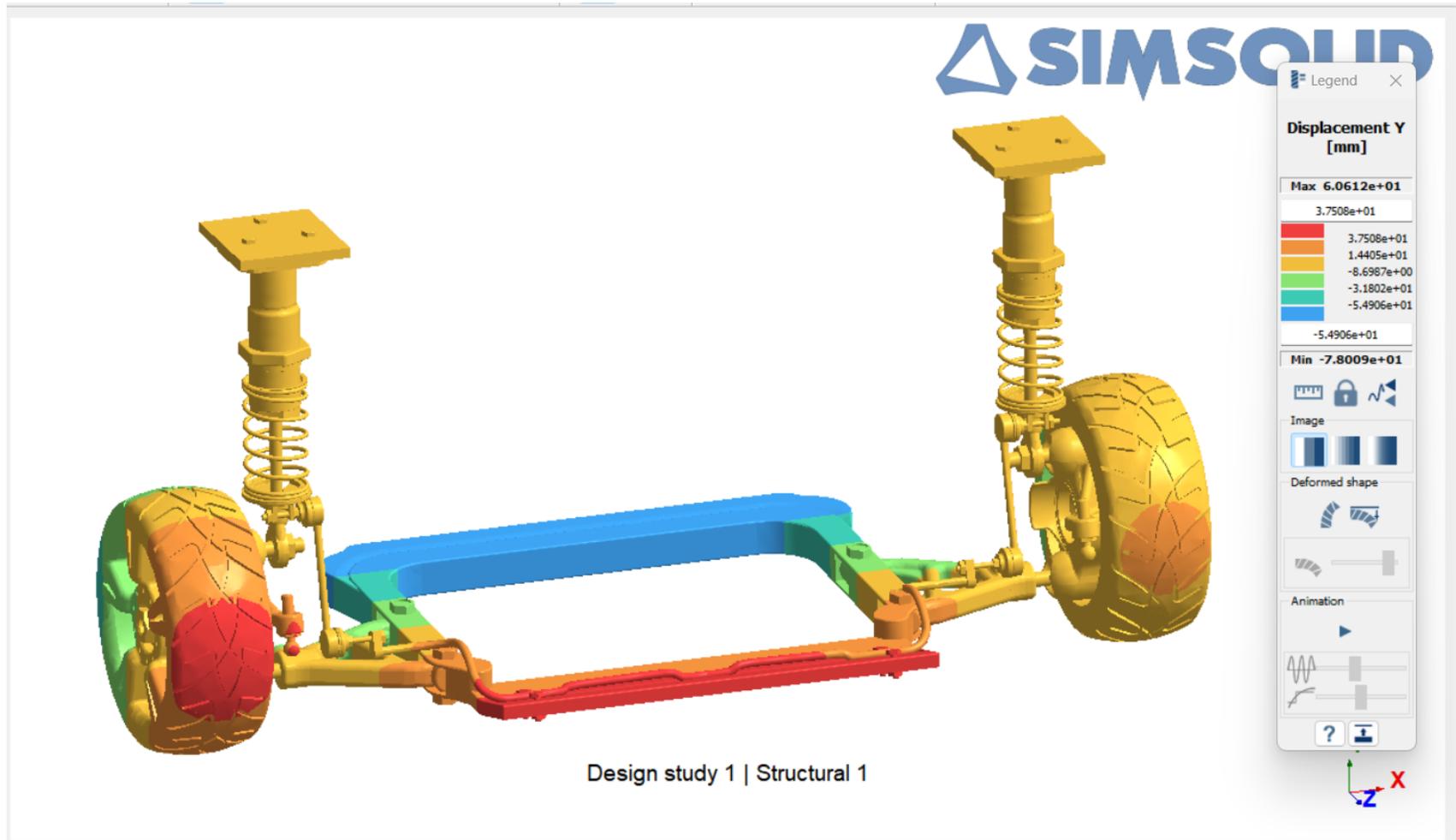


ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA

Anexo-E

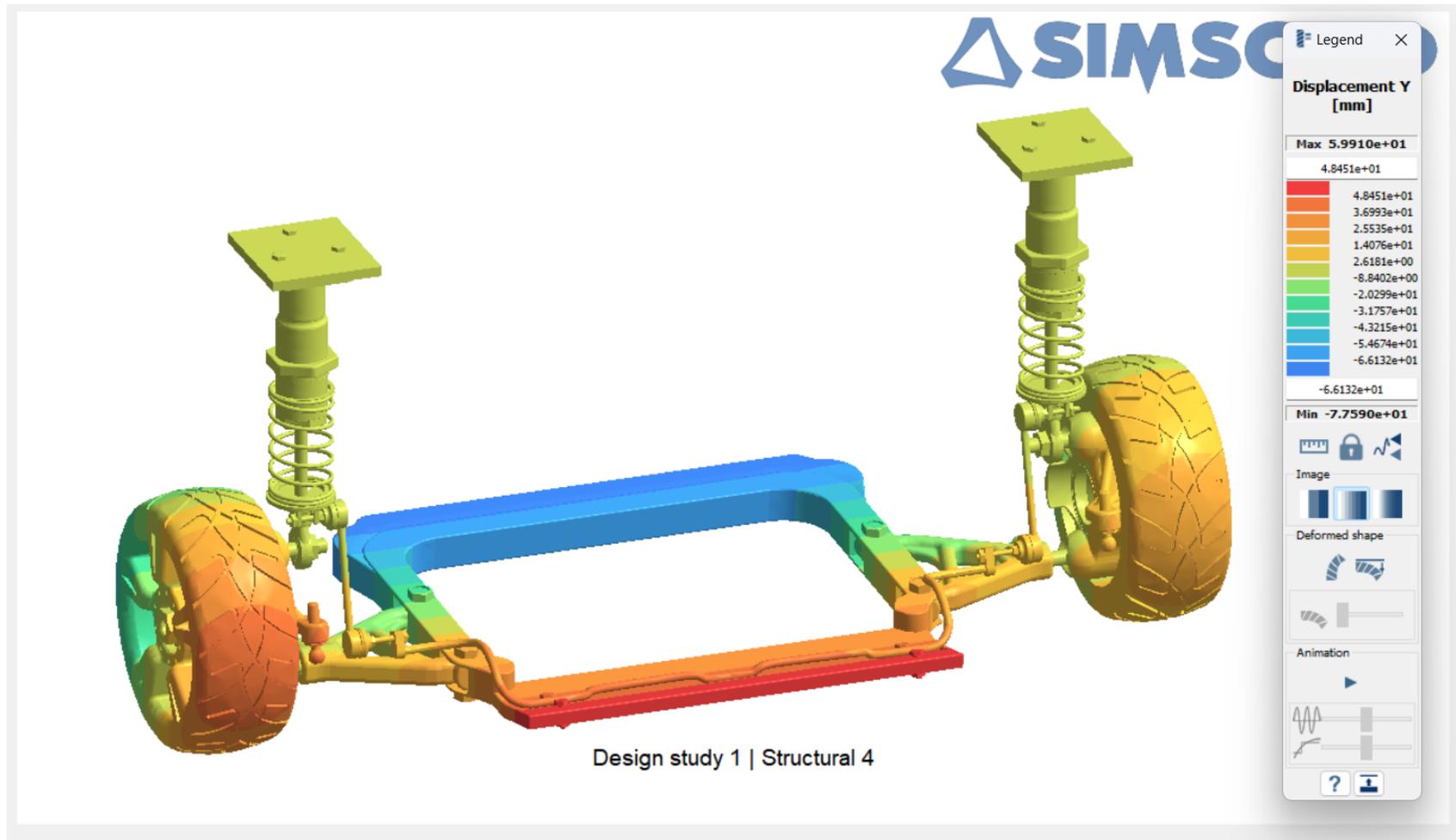
Simulación en SimSolid y primer caso de estudio de deformación de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L

ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA



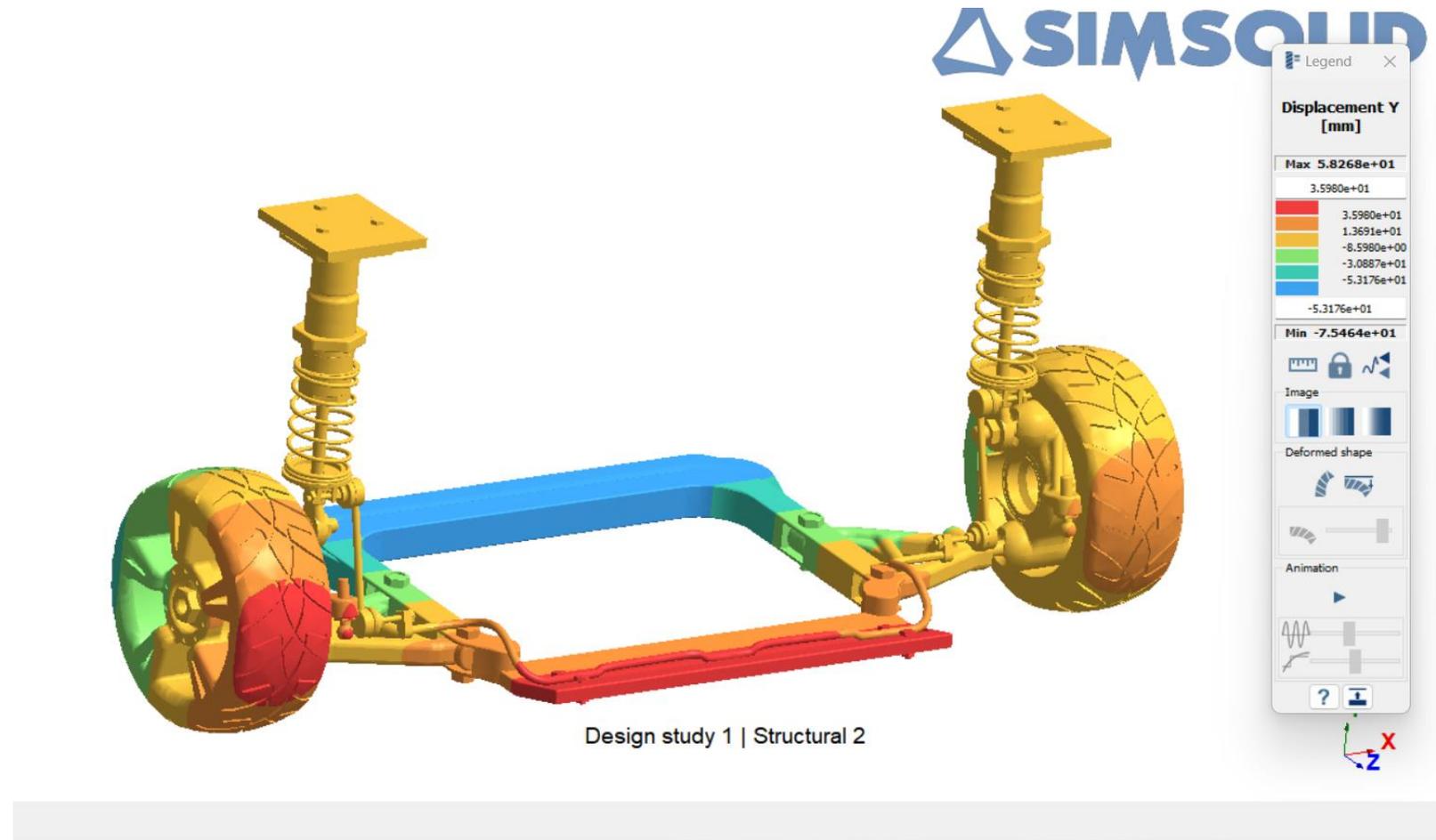
Anexo-F

Simulación en SimSolid y segundo caso de estudio de deformación de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L



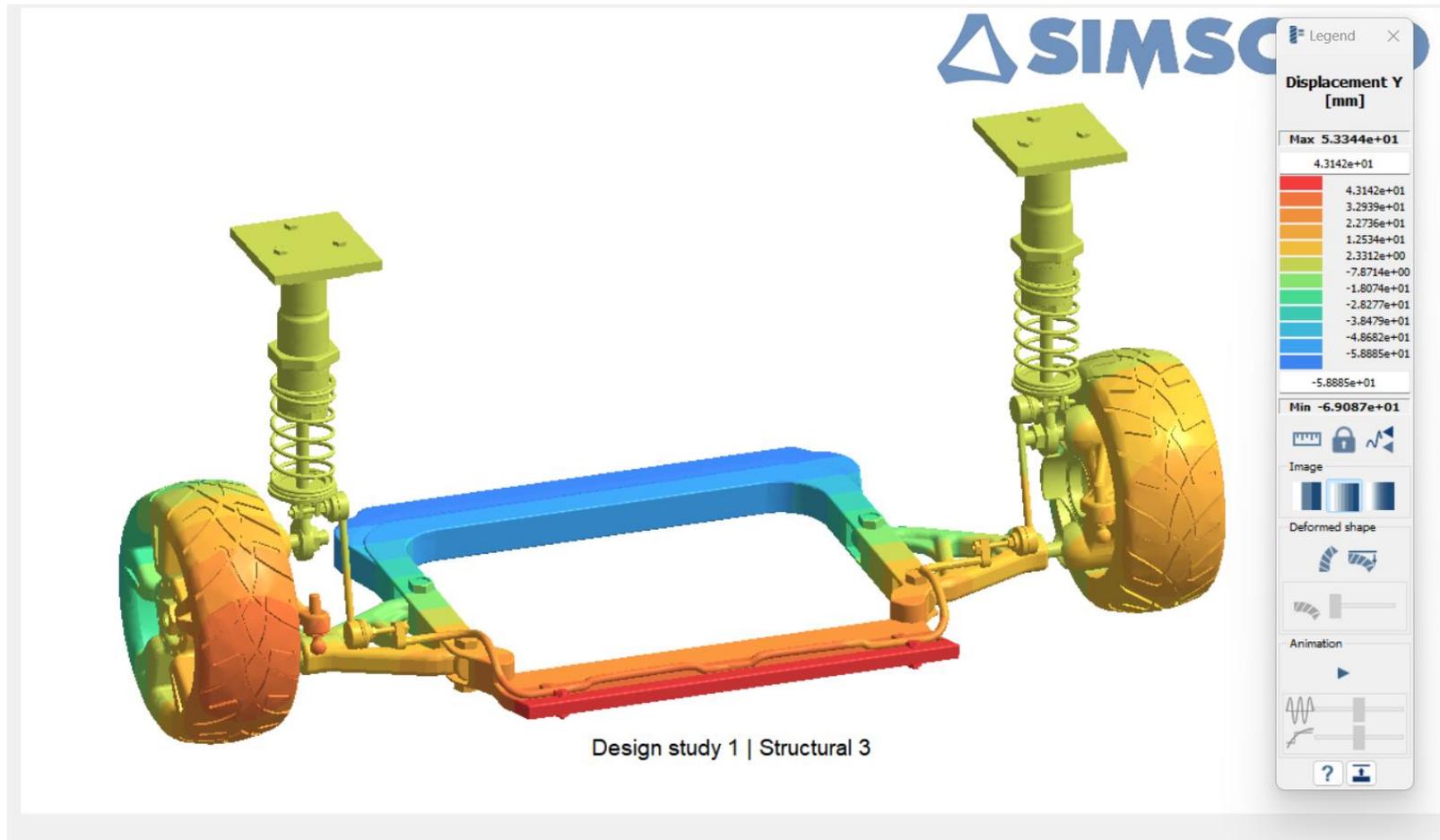
Anexo-G

Simulación en SimSolid y tercer caso de estudio de deformación de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L



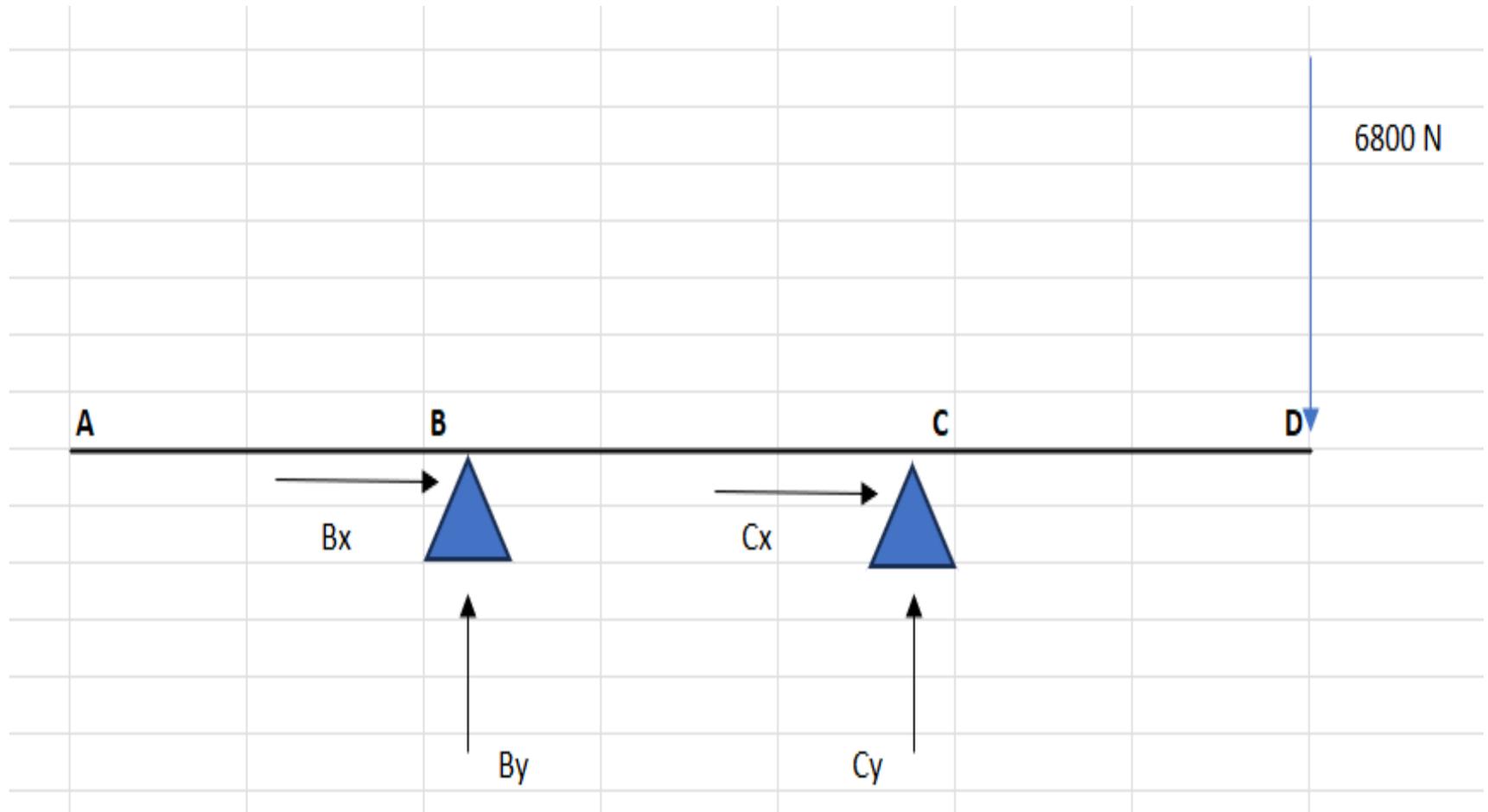
Anexo-H

Simulación en SimSolid y cuarto caso de estudio de deformación de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L



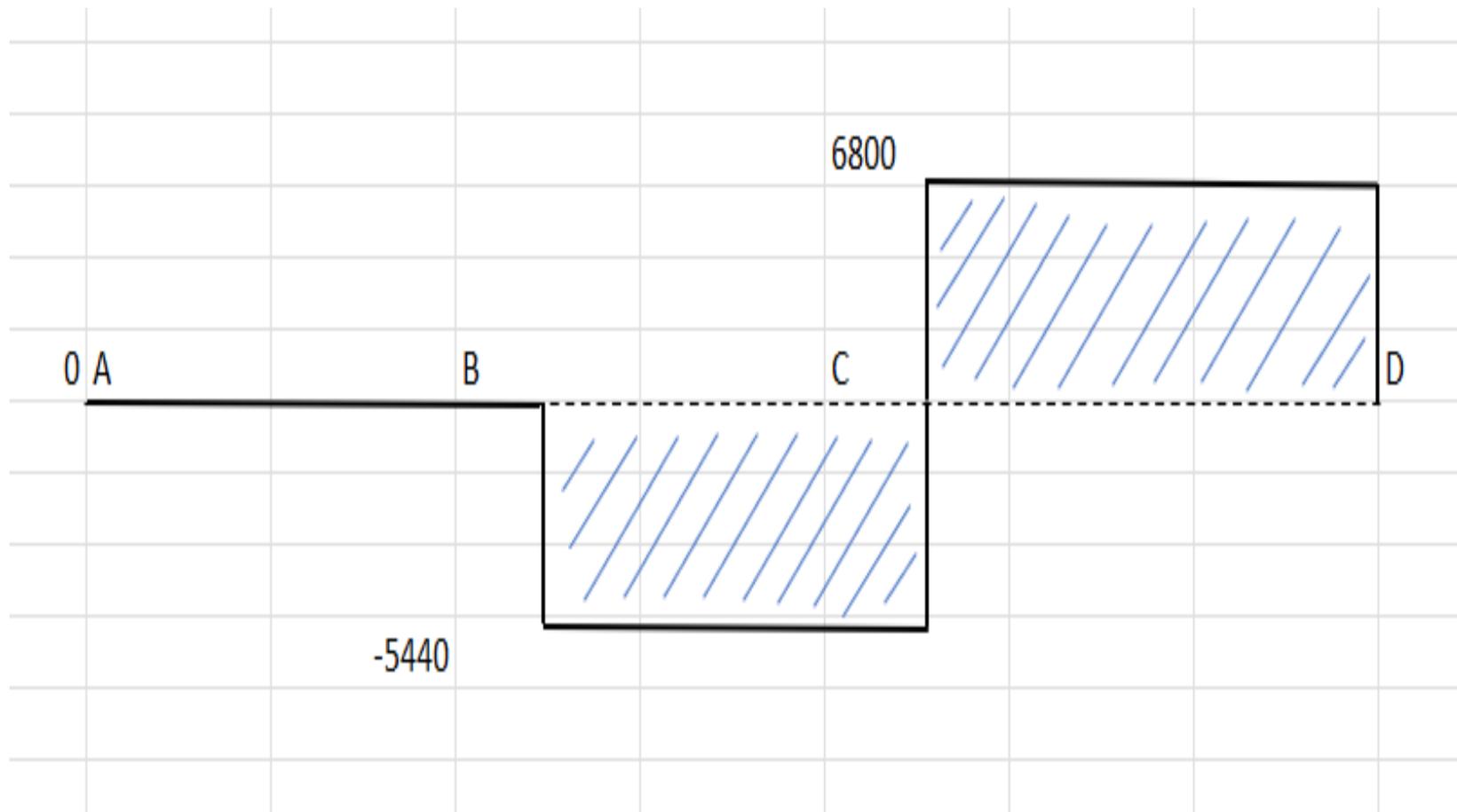
Anexo-I

Diagrama de cuerpo libre de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L debido al efecto de un bache



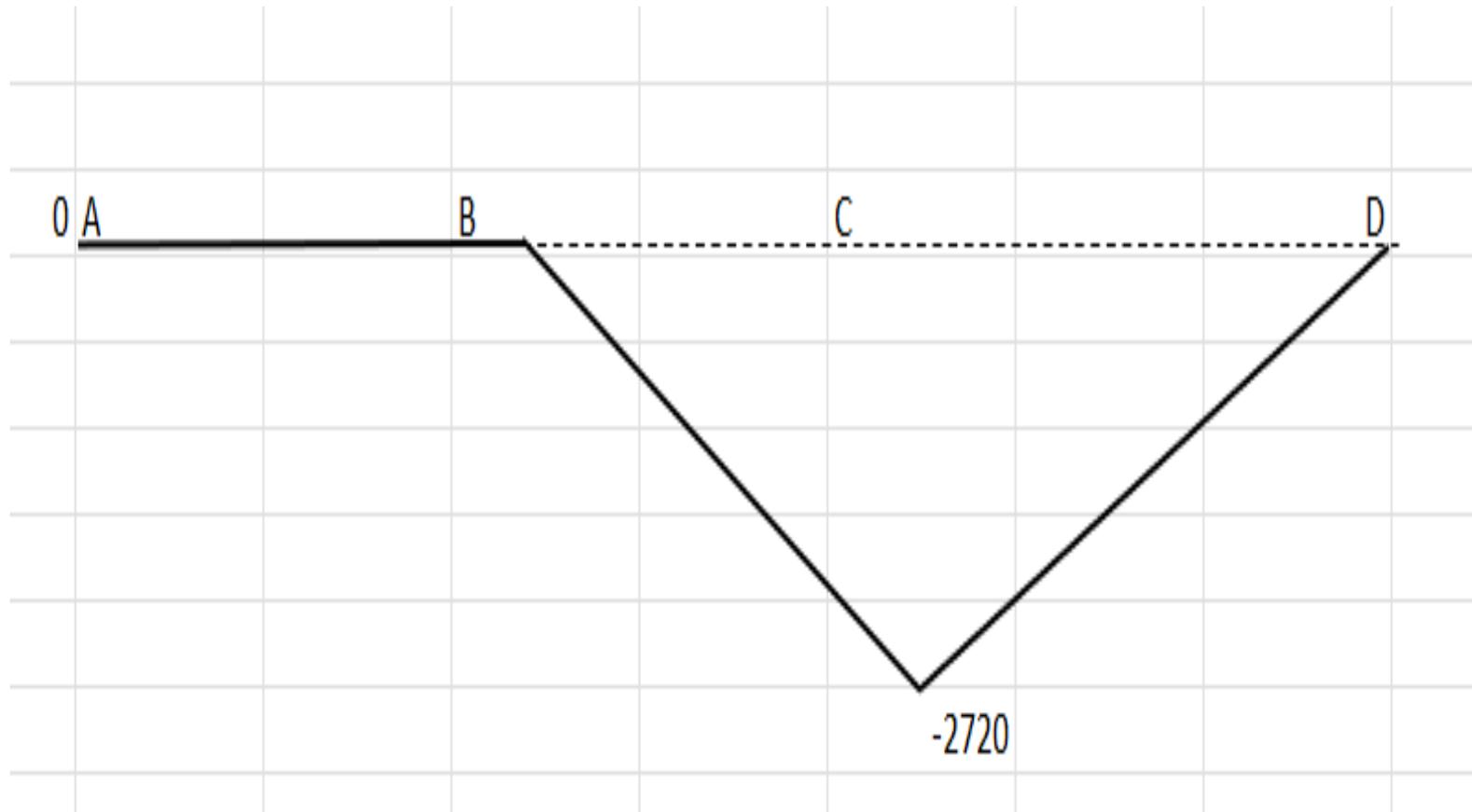
Anexo-J

Diagrama de fuerzas de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L debido al efecto de un bache



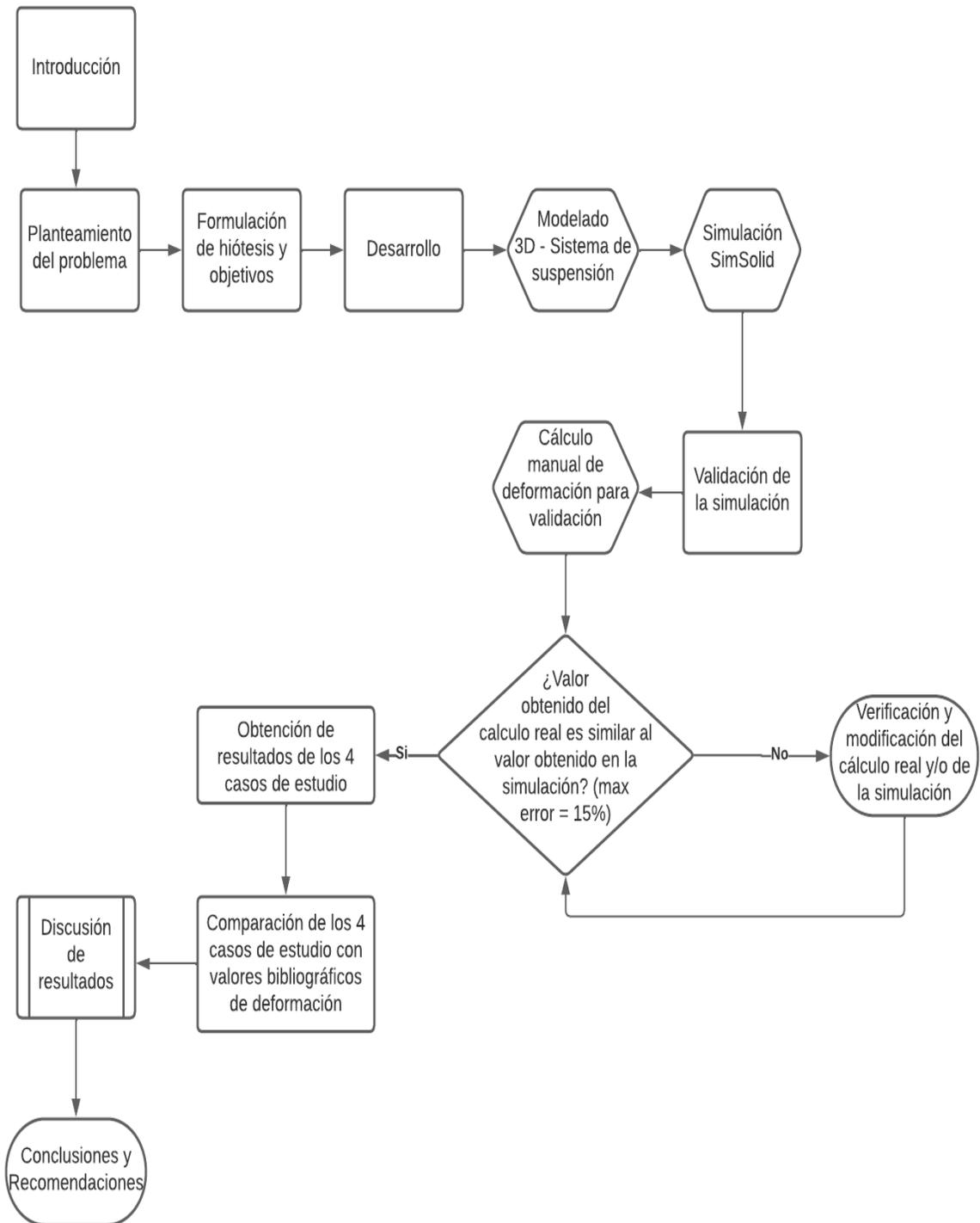
Anexo-K

Diagrama de momento flector de la barra estabilizadora del sistema de suspensión de un Hyundai Elantra 2010 1.6L debido al efecto de un bache



Anexo-L

Diagrama de flujo del proceso de desarrollo del trabajo de titulación



ANALISIS DE DEFORMACIÓN DE LA BARRA ESTABILIZADORA