

Comparación Mediante procesos de Simulación Mecánica entre un sistema de
suspensión de un NLR y Nuevo Sistema

Jorge David Tapia Rodríguez

Universidad Internacional SEK

Nota del autor

Jorge David Tapia Rodríguez, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad
Internacional SEK. Director Ing. Jaime Molina, M.Sc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
jtapia.mec@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, JORGE DAVID TAPIA RODRIGUEZ, con cédula de identidad 172162407-8, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o 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 correspondientes 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.

JORGE DAVID TAPIA RODRIGUEZ

C.I.: 172162407-8

Agradecimientos

- Agradezco a Dios por la vida que me ha regalado y mi compañero permanente.
- A mis padres y familiares que no han escatimado esfuerzos sin los cuales no hubiera sido posible culminar este proyecto.
- Singular gratitud a la Universidad Internacional SEK, a sus autoridades y docentes por todas las enseñanzas académicas.

Contenido

Declaración Juramentada	2
Agradecimientos	3
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
Funciones del Sistema de Suspensión.....	12
Ballesta.....	13
Tipos de ballesta	14
1. Ballesta de acción lineal.....	14
2. Ballesta de acción progresiva.....	14
Tipos de ballesta progresiva.....	15
1. Contramuelle:.....	15
Los tipos de ballesta denominados contramuelle (figura 6) hacen que “	15
2. Acción lineal con ballesta auxiliar:.....	15
3. Contramuelle y auxiliar:.....	15
Configuración de las ballestas.....	16
Montaje de la Ballesta.....	17
Articulación Silentbloc	17
Ventajas e inconvenientes de la Ballesta	17
Material de la Ballesta	18
Tratamiento térmico templado y revenido	18
Análisis de elementos finitos	19
Ductilidad.....	20
Densidad	21
Esfuerzo de Von-Misses	21
Factor de seguridad	22

Método	23
Uso de software.....	25
Cálculos Teóricos.....	31
Calculo de la masa de la ballesta del camión NLR.....	31
Calculo de la masa de la ballesta prototipo I	32
Calculo de la masa de la ballesta prototipo II	33
Los datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo II, se presentan en la tabla 4.	33
Resultados	36
Ballesta camión NLR.....	36
Ballesta prototipo I.....	40
Ballesta prototipo II	44
Discusión	49
Conclusiones:	51
Recomendaciones:	51
Referencias.....	52
Anexo A.....	55
Anexo B	60
Anexo C	61

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1. Datos Ballesta Camión NLR.....	24
Tabla 2. Datos para el cálculo de masa de la ballesta original del camión NLR.....	31
Tabla 3 Datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo I.....	32
Tabla 4. Datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo II.....	33
Tabla 5. Datos para cálculo del porcentaje en ahorro.....	34
Tabla 6. Datos para obtener el porcentaje de error entre lo analítico y lo simulado.....	34
Tabla 7. Resultados obtenidos de la ballesta original del camión NLR	36
Tabla 8. Resultados obtenidos del prototipo I de ballesta para el camión NLR.....	40
Tabla 9. Resultados obtenidos del prototipo II de ballesta para el camión NLR.....	44

Figuras

<i>Figura 1.</i> Sistema de Suspensión. <i>Obtenido de</i> (Toyota , 2003).	12
<i>Figura 2.</i> Elementos de la Ballesta. <i>Obtenido de</i> (Bello, 2011).	13
<i>Figura 3.</i> Movimiento de la gemela. <i>Obtenido de</i> (Bello, 2011).	14
<i>Figura 4.</i> Ballesta de acción lineal. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	14
<i>Figura 5.</i> Ballesta de acción progresiva. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	15
<i>Figura 6.</i> Ballesta Progresiva de Contramuelle. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	15
<i>Figura 7.</i> Ballesta de acción lineal. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	15
<i>Figura 8.</i> Ballesta contramuelle y auxiliar. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	16
<i>Figura 9.</i> Ballesta con forma de trapecio. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	16
<i>Figura 10</i> Ballesta Parabólica. <i>Obtenido de</i> (RNA, 2013).	16
<i>Figura 11.</i> Montaje de la ballesta. <i>Obtenido de</i> (Alonso, 2011).	17
<i>Figura 12.</i> Articulación Silentbloc. <i>Obtenido de</i> (GTZ, 1985).	17
<i>Figura 13.</i> Ballesta trasera camión NLR (vista frontal).	23

Figura 14. Ballesta trasera camión NLR (vista lateral).....	24
Figura 15. Ventana de trabajo ANSYS.....	25
Figura 16. Configuración del material.....	26
Figura 17. Modelado en 2D.....	27
Figura 18. Modelado en 3D.....	27
Figura 19. Contacto entre las regiones.....	28
Figura 20. Mallado.....	28
Figura 21. Restricciones de soportes.....	29
Figura 22. Aplicación de la fuerza.....	29
Figura 23. Simulación.....	30
Figura 24. Convergencia inestable.....	30
Figura 25. Convergencia estable.....	30
Figura 26. Resultados de deformación total de la ballesta original.....	37
Figura 27. Esfuerzo de Von-Misses. Ballesta original.....	37
Figura 28. Zona de deformación máxima localizada en la ballesta original.....	38
Figura 29. Zona de mayor esfuerzo localizado en la ballesta original.....	38
Figura 30. Factor de seguridad de la ballesta original.....	39
Figura 31. Gráfica de convergencia de la ballesta original.....	39
Figura 32. Deformación total de la ballesta prototipo I.....	41
Figura 33. Esfuerzo de Von-Misses de la ballesta prototipo I.....	41
Figura 34. Zona de deformación máxima localizada en la ballesta prototipo I.....	42
Figura 35. Zona de mayor esfuerzo localizado en la ballesta prototipo I.....	42
Figura 36. Factor de seguridad de la ballesta prototipo I.....	43
Figura 37. Gráfica de convergencia de la ballesta prototipo I.....	43
Figura 38. Deformación total de la ballesta prototipo II.....	45

Figura 39. Esfuerzo de Von-Misses de la ballesta prototipo II.....	45
Figura 40. Zona de deformación máxima en la ballesta prototipo II.....	46
Figura 41. Zona de mayor esfuerzo en la ballesta prototipo II.....	46
Figura 42. Factor de seguridad de la ballesta prototipo II.	47
Figura 43. Gráfica de convergencia de la ballesta prototipo II.....	47
Figura 44. Gráfica de simulación para cálculo de error.....	48
Figura 45. Dispersión de puntos de los esfuerzos de cada ballesta.	50
Figura 46. Dispersión de puntos de la deformación de cada ballesta.	50
Figura 47. Software ANSYS con licencia libre.	59

Resumen

Se realizó una comparación mediante procesos de simulación mecánica (análisis estructural) entre: el elemento flexible (ballesta) del camión NLR y nuevos elementos propuestos que soportan las mismas condiciones de carga (1800kg); para ello se determinó las dimensiones del elemento flexible original del camión NLR para simularlos en la plataforma ANSYS utilizando análisis de elementos finitos (MEF); además, se propuso nuevos elementos flexibles con el material vigente en la normativa ecuatoriana; finalmente se obtuvo resultados como: la deformación total, esfuerzo de Von- Mises, factor de seguridad y gráfica de convergencia. Llegando a la conclusión que la ballesta prototipo II presenta ventajas en referencia a la masa, costo de manufacturación y un factor de seguridad que se encuentra dentro del rango permitido.

Palabras clave: ANSYS, Ballesta, Simulación mecánica, Factor de seguridad, MEF.

Abstract

A comparison was made in this work through processes of mechanical simulation (structural analysis) between: the flexible element (leaf spring) truck NLR and proposed new elements that support the same load conditions (1800kg); for that first, the dimensions of the original flexible element NLR truck for subsequent simulation on the platform was determined using ANSYS finite element analysis (FEA); second, new flexible elements with the material force in Ecuadorian legislation was proposed; and third, results were obtained as deformation of the graphic, Von- effort Misses, safety factor and convergence. Concluding that the leaf spring prototype II has advantages in reference to the mass, manufacturing cost and a factor of safety that is within the allowable range.

Keywords: ANSYS, Leaf spring, Mechanical simulation, Factor of safety, FEA.

Introducción

“H. Manosalvas Coordinador del centro de atención al cliente declaro que durante el primer trimestre del año 2014 se incrementó en un 37,58% el cambio de la ballesta trasera del camión NLR en las instalaciones del concesionario Automotores Continental Sucursal Labrador, que es una de las casas comerciales representantes de la marca Chevrolet en Ecuador”. (H. Manosalvas, informe trimestral, 11 de abril de 2014). De igual manera “S. Cadena Asesor de servicio declara que los clientes que acuden al concesionario para un cambio de la ballesta trasera del camión NLR, aducen que la ballesta se rompe durante las operaciones de trabajo”. (S. Cadena, comunicado personal, 15 de abril de 2014).

Debido a las quejas presentadas por los clientes al concesionario se ha visto la necesidad, de realizar una comparación entre la ballesta actual del camión NLR y dos prototipos: el uno de configuración parabólica y el otro de configuración recta, utilizando el material vigente en la normativa ecuatoriana INEN 3017, a través de varias simulaciones se analizara el comportamiento de: deformación total, esfuerzo de Von-Misses y factor de seguridad de los prototipos I y II para analizar los resultados y concluir cual es la configuración más adecuada para la construcción de las ballestas.

El objetivo general de este proyecto es comparar la ballesta del camión NLR versus dos prototipos diseñados, mediante un proceso de simulación mecánica, para buscar un prototipo que sea más económico y preste las mismas funciones que la original.

Para el inicio del estudio, se contó con varios datos proporcionados por el concesionario Automotores Continental acerca de la ballesta actual, que será comparado con dos prototipos de ballesta diseñadas, que habrían posibles ventajas; como la disminución de peso sin influenciar en la capacidad de carga, junto con una mayor facilidad de construcción y costos reducidos (Alonso, 2011, pág. 459).

El sistema de suspensión de un vehículo brinda confort para los ocupantes y estabilidad del vehículo en todo momento, por lo tanto, dicho sistema deberá tener dos cualidades necesarias: elasticidad, que evita que las imperfecciones del terreno sean transmitidas al vehículo y amortiguación que impida un balanceo exorbitante.

El peso del vehículo está relacionado directamente con la suspensión, ya que se enlazan la masa suspendida que comprende todos los mecanismos soportados por el bastidor, grupo moto propulsor, carrocería y la masa no suspendida conformada por las partes del vehículo.

La suspensión está conformada de forma general por elementos flexibles o elásticos, como son: muelles, ballesta, barra de torsión, cuya función es la de absorber la energía generada por los impactos del neumático producto de las imperfecciones de la superficie del terreno y el elemento de amortiguación (amortiguador), el cual cumple la función de neutralizar las oscilaciones de masa suspendida originada por los elementos flexibles al devolver la energía acumulada durante el impacto.(véase figura1).

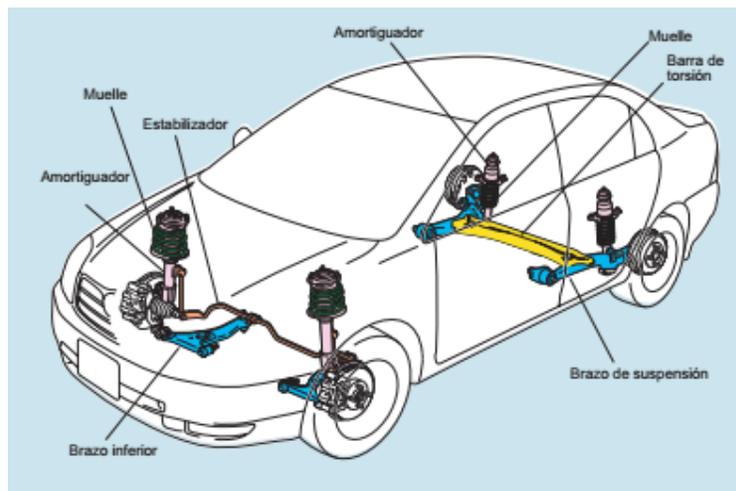


Figura 1. Sistema de Suspensión. Obtenido de (Toyota , 2003).

Funciones del Sistema de Suspensión

Dentro de las funciones del sistema de suspensión están:

- Transmitir fuerzas de aceleración y frenado entre los ejes y el bastidor.

- Resistir el par motor y el frenado junto con las aceleraciones que se presentan en curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido.
- Conservar el paralelismo entre los ejes y la perpendicularidad del bastidor.
- Proporcionar estabilidad adecuada ante el balanceo.
- Absorber las oscilaciones producidas durante la conducción incluyendo las vibraciones.

Ballesta

Es uno de los elementos elásticos del sistema de suspensión, compuesto por una serie de hojas de acero que forman un conjunto elástico y resistente a la rotura. El conjunto de ballestas se conforma por una hoja mayor denominada ‘‘maestra’’ con los extremos curvos, donde se alojan los bulones para la fijación al bastidor y las demás hojas van decreciendo longitudinalmente de arriba hacia abajo. Todas las hojas van unidas en el centro por medio de un perno capuchino y se mantienen alineadas por medio de abrazaderas o abarcones como se observa en la figura 2.

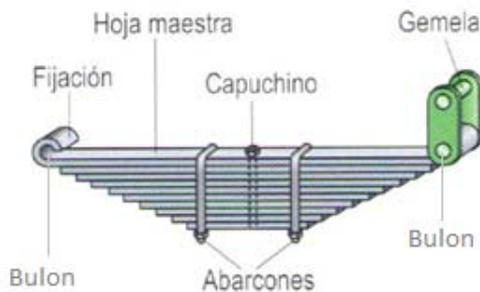


Figura 2. Elementos de la Ballesta. Obtenido de (Bello, 2011).

‘‘La hoja maestra va fijada al bastidor mediante una articulación denominada gemela, que tiene la finalidad de absorber las variaciones de longitud que sufre al deformarse’’ (Crouse, 1993, pág. 225) como se observa en la figura 3.

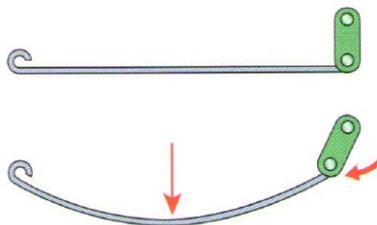


Figura 3. Movimiento de la gemela. Obtenido de (Bello, 2011).

La ballesta se define por la longitud, ancho de las hojas, espesor de las mismas y el número de hojas de las que consta el conjunto. La suspensión por ballestas se emplea en vehículos de carga pesada, ya que se encuentran destinados para absorber grandes cargas e irregularidades del camino, evitando que el impacto se transfiera a la carrocería.

Tipos de ballesta

Los tipos de ballestas que existen en el mercado son:

1. Ballesta de acción lineal

Se denomina así (figura 4.) porque el funcionamiento puede ser representado por una línea recta, “se caracteriza por tener un único coeficiente de elasticidad en todo su recorrido y se usa en el eje en el cual las variaciones de carga no son significativas” (RNA, 2013).



Figura 4. Ballesta de acción lineal. Obtenido de (RNA, 2013).

2. Ballesta de acción progresiva

Se caracteriza (figura 5.) por tener un coeficiente de elasticidad variable, bajo al principio y más alto al final, la transición de uno al otro es progresiva a medida que aumenta la carga. Se usan en la parte trasera de la mayor parte de los vehículos, en que la variación de carga es significativa, proporcionando más comodidad cuando el vehículo circula vacío y más resistencia cuando lo hace cargado, garantizando de esta manera excelentes condiciones de conducción (RNA, 2013).



Figura 5. Ballesta de acción progresiva. Obtenido de (RNA, 2013).

Tipos de ballesta progresiva

1. Contramuelle:

Los tipos de ballesta denominados contramuelle (figura 6) hacen que “la transición de una etapa a la otra ocurra con suavidad, de acuerdo con la carga” (RNA, 2013).



Figura 6. Ballesta Progresiva de Contramuelle. Obtenido de (RNA, 2013).

2. Acción lineal con ballesta auxiliar:

Las ballestas de acción lineal con ballesta auxiliar o ballestin (figura 7) hacen que “la transición de una etapa a la otra ocurra con brusquedad, de acuerdo con la carga” (RNA, 2013).



Figura 7. Ballesta de acción lineal. Obtenido de (RNA, 2013).

3. Contramuelle y auxiliar:

El tipo de ballesta contramuelle y auxiliar se utiliza en vehículos que son sometidos a variación de carga en forma brusca, recomendando por ello, que sean usados en vehículos tipo bañeras (RNA, 2013).



Figura 8. Ballesta contramuelle y auxiliar. Obtenido de (RNA, 2013).

Configuración de las ballestas

Las configuraciones de ballestas que existen en el mercado son:

Ballestas con varias hojas en forma de trapecio, lo que permite que los impactos se distribuyan en el escalonamiento de las hojas (véase figura 9).



Figura 9. Ballesta con forma de trapecio. Obtenido de (RNA, 2013).

Ballestas parabólicas (figura 10) que tienen un espesor variable a lo largo de las hojas, proporcional a los impactos que soporta cada punto de la hoja, esta configuración permite “que la ballesta use pocas hojas o una sola, para disminuir el peso sin desmedro de la capacidad de carga y de la durabilidad, que son iguales a las de la ballesta de varias hojas en forma de trapecio” (RNA, 2013).



Figura 10 Ballesta Parabólica. Obtenido de (RNA, 2013).

Montaje de la Ballesta

El montaje de la ballesta se lo realiza por medio de bridas y ligeramente por delante de su centro, con la finalidad de evitar desplazamientos eventuales del eje con respecto a la ballesta; la unión de la ballesta al chasis se lo realiza por medio de un tornillo pasante y un casquillo elástico llamado silentbloc que se ubica en el punto fijo de la misma (véase figura 11.) (Martinez, 2000, págs. 978-982).

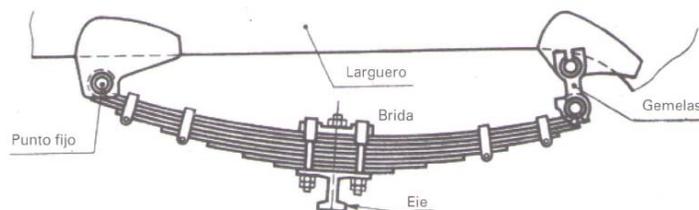


Figura 11. Montaje de la ballesta. Obtenido de (Alonso, 2011).

Articulación Silentbloc

Se denomina articulación silentbloc (figura12) a aquella que está formada por “dos manguitos de acero, unidos entre sí por un casquillo de caucho que se colocan a presión entre sí, logrando amortiguar las oscilaciones y ruidos; ya que se encuentran sometidos a sollicitaciones de tracción, compresión y torsión” (GTZ, 1985, pág. 409).

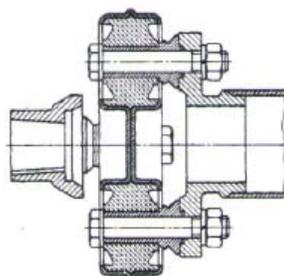


Figura 12. Articulación Silentbloc. Obtenido de (GTZ, 1985).

Ventajas e inconvenientes de la Ballesta

Las ventajas que presenta la ballesta son:

- Deformación en sentido vertical
- Transmitir propulsión y tracción

- Facilidad de construcción
- Costo económico bajo

“Sin embargo, los inconvenientes que presentan es la limitación en el eje delantero, debido al poco ángulo de orientación del neumático, cuando estas son relativamente pesadas” (Bello, 2011, pág. 226).

Material de la Ballesta

El material para la fabricación de ballestas en el Ecuador según la norma técnica INEN 3017 dispone que “los resortes debe ser del grado SAE 5160H, JIS SUP9, SUP9A, o su equivalente” (INEN3017, 2015), caracterizado por presentar componentes elevados de: carbono, cromo, manganeso así como una gran tenacidad, templabilidad, resistencia a la fatiga, tracción y sus propiedades mecánicas (refiérase tabla A-1).

Sin embargo, todas las “hojas de resorte se someterán a un tratamiento térmico concerniente a un temple y revenido para conferirles las propiedades de dureza establecidos en NTE INEN ISO 6508-1” (INEN3017, 2015).

Tratamiento térmico templado y revenido

El temple es un proceso de calentamiento seguido de un enfriamiento rápido para conseguir mayor dureza y resistencia mecánica del acero. Para ello, se calienta el acero una hora por cada 2 mm de espesor o dimensión transversal media de la pieza, a una temperatura entre 850°C - 900°C, después se realiza un enfriamiento rápido en aceite porque garantiza la formación de microestructuras, posterior al templado se realiza un proceso de revenido a una temperatura ente 150°C- 800°C durante una hora por pulgada de espesor con la finalidad de disminuir la dureza, la resistencia y aumentar la tenacidad, a la vez se eliminan las tensiones creadas en el temple, dejando al acero con la dureza deseada (Universidad Tecnológica de Pereira , 2011).

Cabe mencionar que al bajar la temperatura del revenido, se van obteniendo micro estructuras cada vez más finas y más duras, por lo tanto la norma INEN 3017 “establece que el proceso de temple y revenido se lo debe realizar a 200°C y comprobar la dureza Brinell HB se encuentre en un rango de 617-630” (INEN3017, 2015).

Análisis de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es una de las herramientas más utilizadas en la ingeniería, los softwares de simulación utilizan este método para determinar con mayor precisión los esfuerzos realizados en cada material (Shigley, 2008). El análisis de elementos finitos es la transformación de sistemas físicos con un sistema matemático con infinitas incógnitas a un sistema matemático con número finito de incógnitas relacionadas entre sí, determinado por elementos de tamaño finito conocido como malla (Universidad de Talca, 2002).

Para este análisis los programas de simulación generan mallas automáticas, compuestas por una red de elementos y nodos (Shigley, 2008). Cada nodo posee ciertas condiciones de contorno estructurales donde se incluyen las restricciones de desplazamientos, fuerzas aplicadas en cada nodo, presiones, temperatura entre otros (Universidad de Talca, 2002). Refinar la malla es un procedimiento en el cual se disminuye el tamaño de cada elemento y por consiguiente aumentar la densidad de la malla en áreas de gradientes de esfuerzo alto y cuando las zonas de transición geométrica se enmallan de manera uniforme, consiguiendo que los resultados sean lo más cercanos a lo obtenido en el cálculo analítico, verificando mediante la convergencia cuando esta tiende a cero (Shigley, 2008).

Dichos programas de simulación tienen la capacidad de reducir automáticamente el tamaño de cada elemento al calcular el error de la solución MEF, permitiendo la reducción de la malla hasta encontrar el esfuerzo requerido. Para elementos de pequeño espesor sometidos a esfuerzos o deformación plana, se utilizan elementos en 2D, pero para estructuras se

utilizan elementos en 3D (tetraedros) ya que no pueden mallarse mediante elementos más simples debido a las curvas y proximidades de la estructura. (Universidad de Talca, 2002)

El programa de simulación ANSYS trabaja con dos métodos de resolución, que se encuentran predeterminados en el código fuente del software para los diferentes tipos de análisis que puede realizar el programa, dichos métodos son:

- Método-p: Obtiene resultados como desplazamientos, tensiones, o deformaciones con un grado de precisión determinado. Para calcular estos resultados, el método-p utiliza un polinomio de grado-p (ecuación constitutiva definida en función de las variables de estado del sistema) con el que se llega a una solución aproximada. Funciona definiendo una malla para un elemento determinado, los resultados se obtienen siguiendo un criterio de convergencia que tiende a 0. Este método es utilizado para análisis estático que se utiliza para determinar los desplazamientos, tensiones, etc bajo condiciones estáticas. (Rodríguez, 2010)
- Método-h: se diferencia del anterior porque no utiliza una malla definida si no una adaptativa generando que la velocidad de resolución del análisis sea menor, se emplea para análisis dinámicos, de fluidos, campos electromagnéticos, etc.(Rodríguez, 2010).

Para determinar el MEF, se debe considerar las condiciones de frontera, realizado limitantes específicas si se tratara de elementos complejos. Si se trata de un elemento simple como una viga plana, el programa de simulación toma la totalidad de la superficie del elemento.

Ductilidad

Es la capacidad de un material a deformarse significativamente antes de llegar a la fractura, por lo tanto, un material se considera dúctil si su elongación es mayor al 5%. (Vanegas, 2008).

Densidad

Es la relación entre la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia, ecuación 1. (Mott, 2006).

Nota: La ecuación de la densidad se usó con el objetivo de obtener la masa de cada prototipo véase (paginas 31-33).

$$\delta = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde:

$$\delta = \text{Densidad} \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$m = \text{Masa} \quad [\text{Kg}]$$

$$V = \text{Volumen} \quad [\text{m}^3]$$

Esfuerzo de Von-Misses

Se define como Esfuerzo de Von Misses (ecuación 2) a la magnitud física proporcional a la energía de distorsión que es utilizada como indicador de calidad de un material dúctil, Shigley (2008) afirma: “ el material no fluiría en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia”.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 * \sigma_3 - \sigma_3} \quad (2)$$

Donde:

$$\sigma' = \text{Esfuerzo de Von-Misses} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_1 = \text{Esfuerzo en el eje de las abscisas} \quad [\text{MPa}]$$

$$\sigma_3 = \text{Esfuerzo en el eje de las ordenadas} \quad [\text{MPa}]$$

Factor de seguridad

Es un índice de certidumbre que presenta un determinado elemento mecánico, donde se visualiza la confiabilidad de la capacidad de carga que presenta el elemento sobre los requerimientos a los que serán sometidos. (Vanegas, 2008).

$$FS = \frac{Sy}{\sigma'} \quad (3)$$

Donde:

FS= Factor de seguridad

Sy = Resistencia a la fluencia [MPa]

σ' = Esfuerzo de Von-Misses [MPa]

Deformación

Se denomina a la ‘‘variación de la flecha con la carga es decir, la diferencia de altura de la ballesta antes y después de someterla a la carga’’. (Alonso, 2011).

$$\emptyset = \frac{P * L^3 * k}{4 * E * a * n * h^3} \quad (4)$$

Nota: El coeficiente del número de hojas es una constante de diseño y tiene un valor de 1,25.

Donde:

\emptyset = Deformación [mm]

P= Peso soportado por la ballesta [Kg]

L= Distancia entre los apoyos [mm]

k= Coeficiente del número de hojas de la ballesta

E= Módulo de Elasticidad [MPa]

a= Ancho [mm]

n= Número de hojas

h= Espesor [mm]

Esfuerzo de trabajo para la carga

Se denomina esfuerzo de trabajo para la carga a ‘‘ la tensión en el centro de la ballesta a consecuencia de la carga soportada’’. (Alonso, 2011).

$$\sigma = \frac{3 * P * L}{2 * E * a * n * h^2} \quad (5)$$

Donde:

σ = Esfuerzo [MPa]

P= Peso soportado por la ballesta [Kg]

L= Distancia entre los apoyos [mm]

E= Módulo de Elasticidad [MPa]

a= Ancho [mm]

n= Número de hojas

h= Espesor [mm]

Método

El primer paso para realizar la simulación de la ballesta del camión NLR (figura 13) es obtener datos de longitud, espesor, ancho, escalonamientos, número de hojas de la ballesta conjuntamente con las propiedades del material (véase tabla A-2) y las condiciones de carga de la misma, detallada en la tabla 1.

Luego de la obtención de los datos se realizara los cálculos teóricos.



Figura 13. Ballesta trasera camión NLR (vista frontal).



Figura 14. Ballesta trasera camión NLR (vista lateral).

Tabla 1

Datos Ballesta Camión NLR.

Material de la ballesta	AISI 6150
Módulo de Elasticidad	190 - 210 GPa
Resistencia a la tracción, último (Sut)	670 MPa
Resistencia a la fluencia, tracción (Sy)	415 MPa
Distancia entre los apoyos de la Ballesta	1050 mm
Ancho de la ballesta	70 mm

Espesor	18mm
Numero de hojas de la ballesta	5
Peso soportado por la ballesta	1800 kg
Frecuencia	100 Vibraciones/minuto

Fuente: (CHEVROLET, 2010)

Uso de software

La simulación de la ballesta del camión NLR se realizó en el software ANSYS que se obtuvo desde el sitio web ANSYS ACADEMIC con licencia libre (anexo A), se procede a abrir la ventana de trabajo del software y seleccionar el tipo de análisis estructural estático con la finalidad de obtener la deformación, esfuerzo y factor de seguridad del elemento modelado en 3D como se observa en la figura 15.

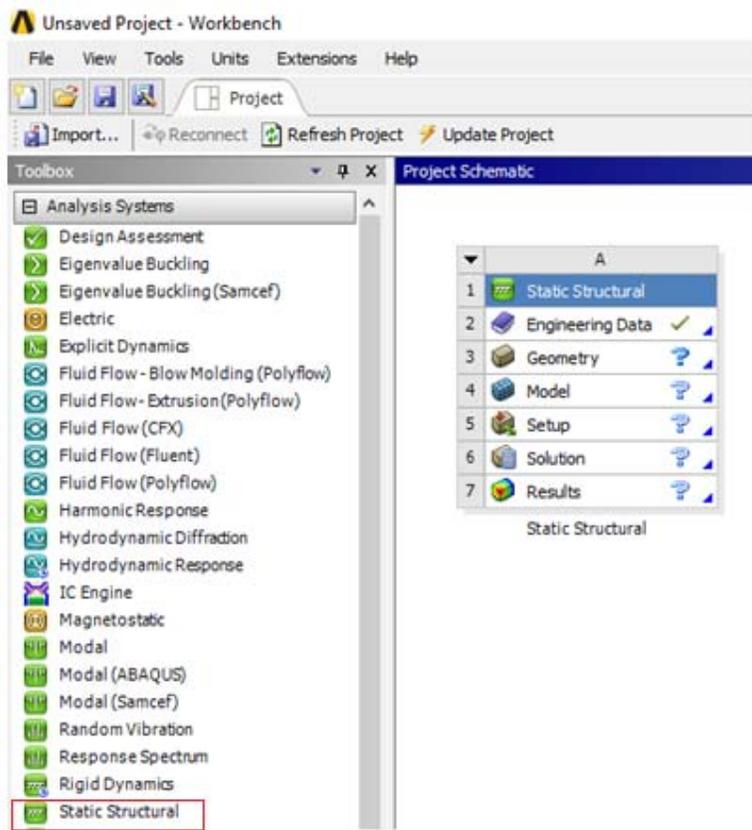


Figura 15. Ventana de trabajo ANSYS.

Se selecciona el material que se utilizará en la simulación del elemento en el submenú de la opción datos de ingeniería, con la finalidad de configurar los parámetros solicitados por el software como: densidad, módulo de elasticidad, resistencias a la tracción y a la fluencia como se observa en la figura 16, ya que la selección del material es crucial porque afecta a las condiciones de contorno esenciales como la restricción de desplazamiento y fuerza aplicada sobre el elemento, al momento de realizar la simulación.

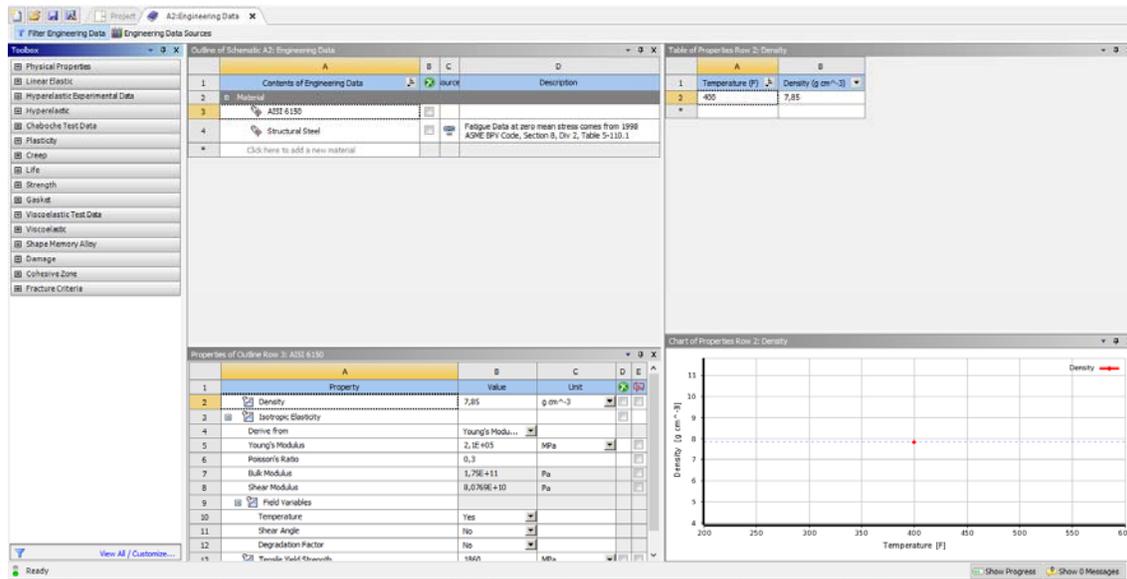


Figura 16. Configuración del material.

Se diseñó el modelado geométrico en 2D con las herramientas del modelador de diseño del software. Dichos modelados se los diseñará en forma individual de la hojas de la ballesta, como se observa en la figura 17; seguidamente se generó una unión entre cada una de las hojas diseñadas en forma individual, con la finalidad de conformar la ballesta del camión en estudio (figura 18) y que se someterá a las condiciones de carga.

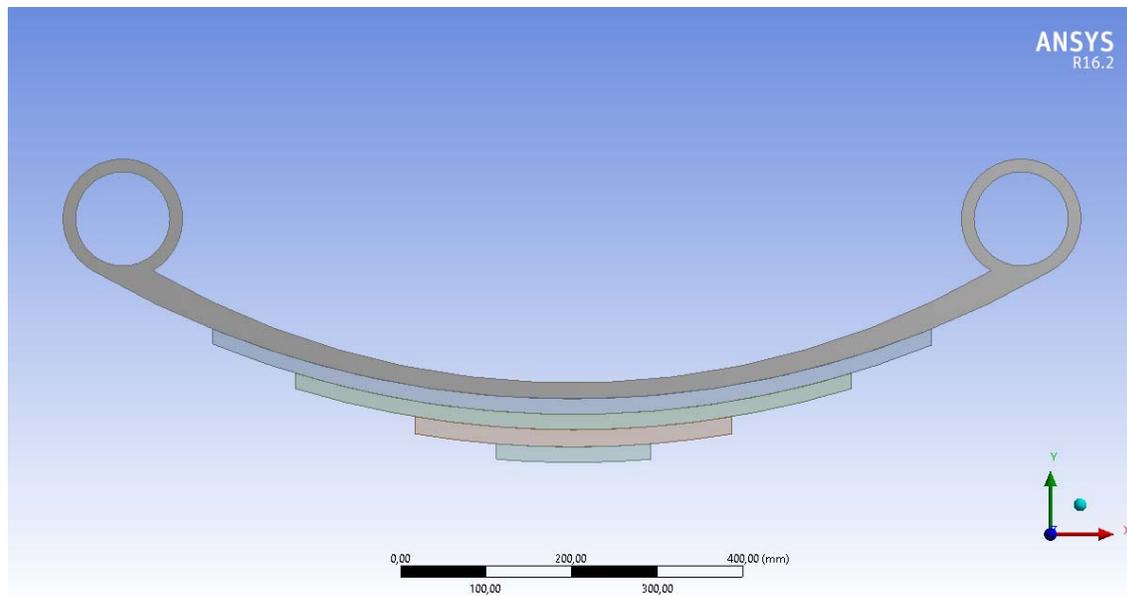


Figura 17. Modelado en 2D.

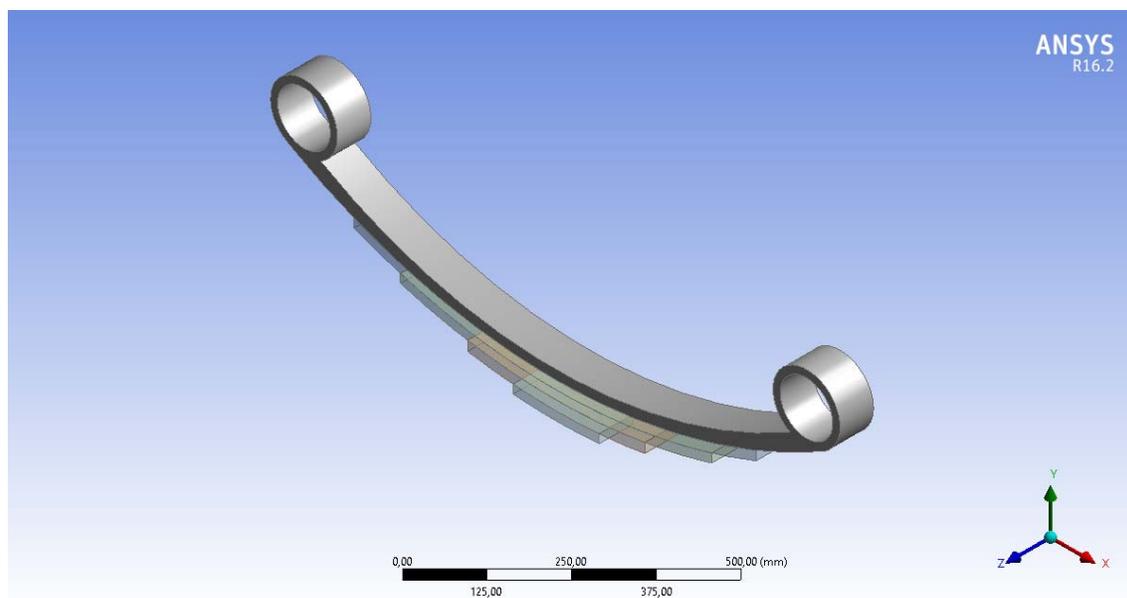


Figura 18. Modelado en 3D.

Se realizó la verificación de conexiones entre las regiones del sólido, de tal manera que el programa no arroje mensajes de alerta con referencia a los contactos entre las regiones (véase figura 19); luego de verificar se realizó un mallado con elementos tetraedros de 4 mm porque es una estructura que presenta curvas; de modo idéntico, se ejecutará un refinamiento a la malla, el cual se aplicará a las proximidades y curvas del sólido (véase figura 20).

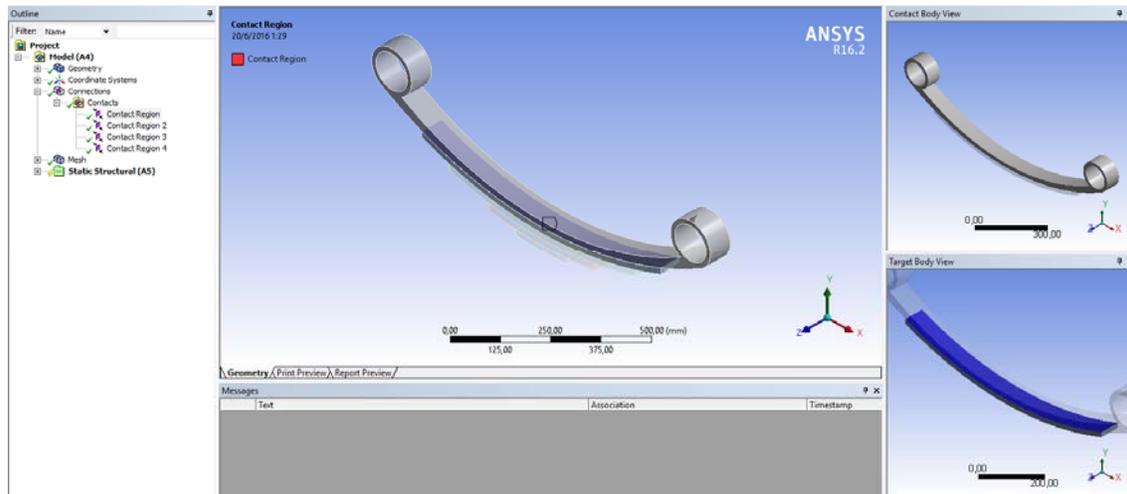


Figura 19. Contacto entre las regiones.

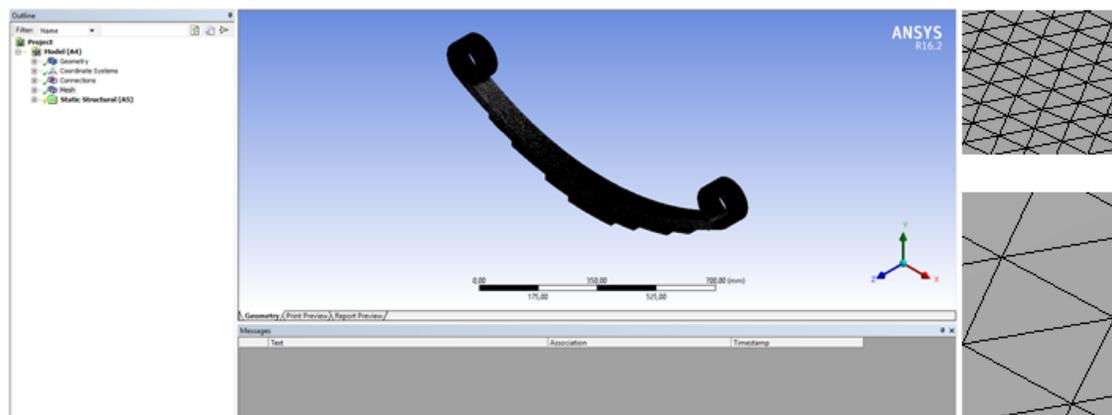


Figura 20. Mallado.

Se determinó las variables de la estructura estática que corresponden a las restricciones de tipo soporte fijo, que se aplicó sobre las caras de los agujeros de la ballesta como se visualiza en la (figura 21); de la misma forma se suministró la fuerza de 18000 N que se aplicó sobre la cara de la última hoja de la ballesta en el eje de las ordenadas positivas

con referencia al sistema de coordenadas definido (véase figura 22).

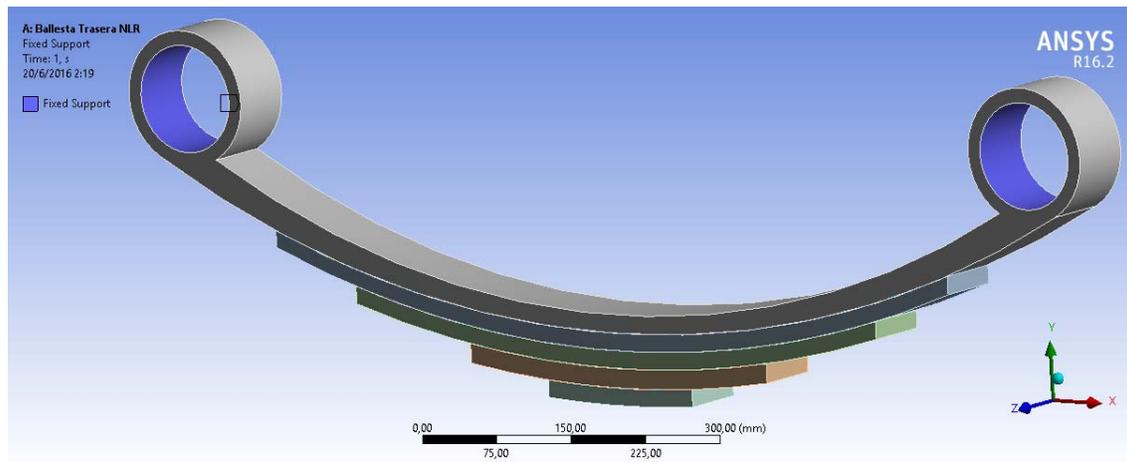


Figura 21. Restricciones de soportes.

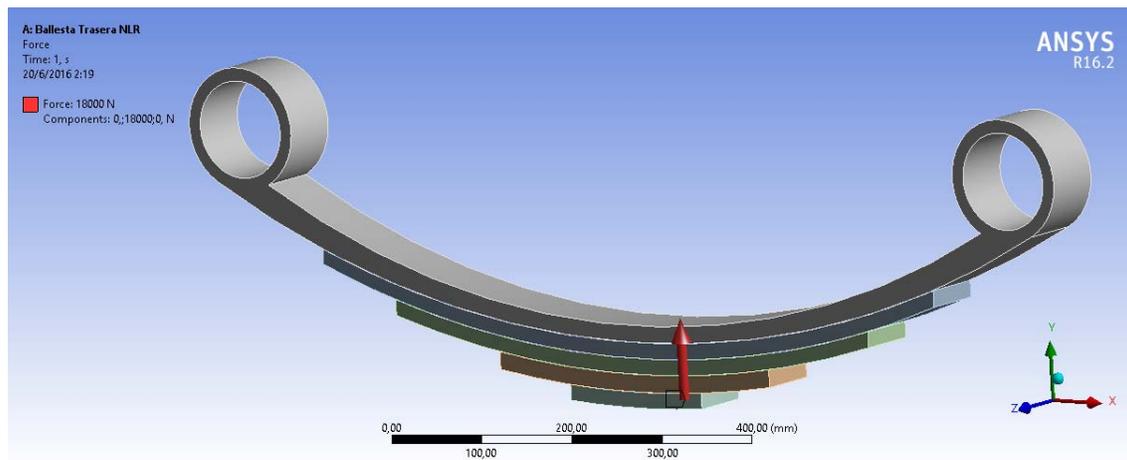


Figura 22. Aplicación de la fuerza.

Se realizó la simulación del sólido donde se visualizará la deformación total, esfuerzo de Von-Misses y factor de seguridad como se observa en la (figura 23); conjuntamente con la gráfica de convergencia que será expresada por el programa (véase figura24). Dicha gráfica es necesaria para visualizar la viabilidad y confiabilidad del sólido (ballesta) simulado, cabe aclarar que la gráfica de convergencia deberá someterse a varias simulaciones hasta que la misma no presente saltos abruptos entre los valores; en otras palabras, hasta que la gráfica de convergencia sea aprobada por el software de simulación como se refleja en la (figura25).

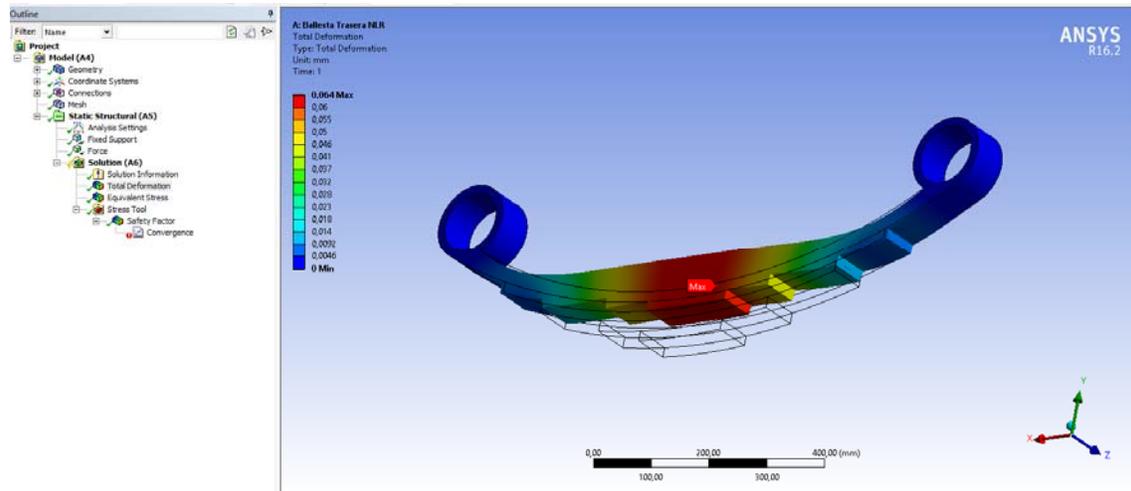


Figura 23. Simulación.

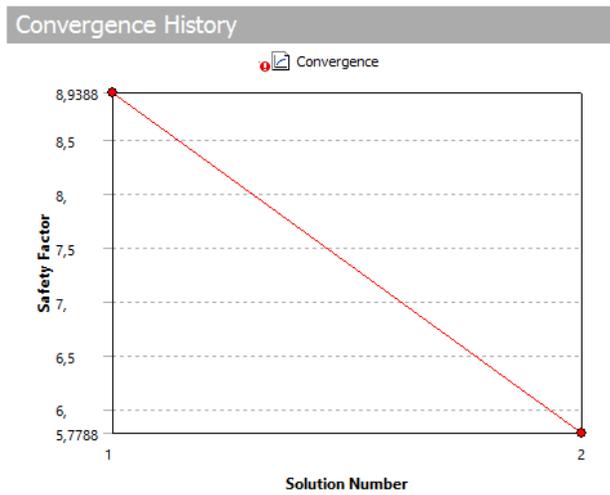


Figura 24. Convergencia inestable.

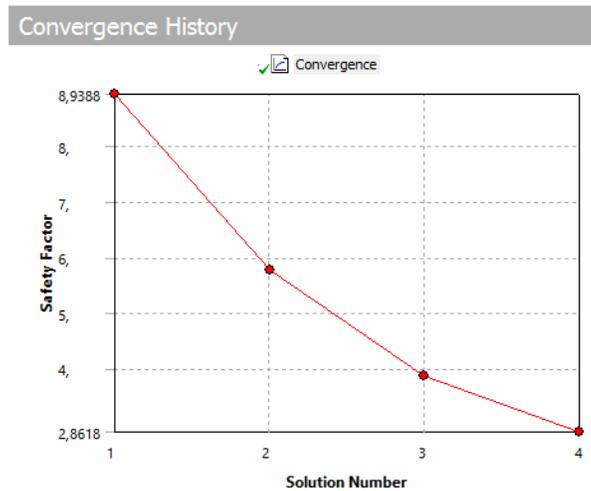


Figura 25. Convergencia estable.

Luego de obtener una convergencia estable como se divisa en la figura 25, se continuará a elaborar dos prototipos de sólidos (ballestas) de diferente configuración pero bajo la misma condición de carga que la ballesta original del camión en estudio, dichos prototipos se realizaron siguiendo los mismos lineamientos expuestos en los párrafos anteriores correspondientes al uso de software, para finalizar los resultados obtenidos tanto de la ballesta original del camión en estudio como de los prototipos desarrollados, se expondrán en el siguiente.

Cálculos Teóricos

Calculo de la masa de la ballesta del camión NLR

Los datos para el cálculo de masa de la ballesta original del camión NLR, se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Datos para el cálculo de masa de la ballesta original del camión NLR

Dato	Símbolo	Valor
Densidad del acero AISI 6150	δ	7,85 g/cm ³
Número de hojas de la ballesta	n	5
Longitud de la hoja 1	n_1	1050 mm
Longitud de la hoja 2	n_2	840 mm
Longitud de la hoja 3	n_3	650 mm
Longitud de la hoja 4	n_4	370 mm
Longitud de la hoja 5	n_5	180 mm
Ancho de la ballesta	a	70 mm
Espesor	h	18mm
Diámetro mayor del tope de la ballesta	D	140 mm
Diámetro menor del tope de la ballesta	d	110 mm

$$m = 7,85 * \left((70 * 18 * (1050 + 840 + 650 + 370 + 180)) \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\pi}{4} * 18 * (140^2 - 110^2) \right) \right)$$

$$m = 0,032 T$$

Calculo de la masa de la ballesta prototipo I

Los datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo I, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo I.

Dato	Símbolo	Valor
Densidad del acero AISI 5160	δ	7,85 g/cm ³
Número de hojas de la ballesta	n	7
Longitud de la hoja 1	n_1	1100 mm
Longitud de la hoja 2	n_2	840 mm
Longitud de la hoja 3	n_3	650 mm
Longitud de la hoja 4	n_4	370 mm
Longitud de la hoja 5	n_5	180 mm
Ancho de la ballesta	a	40 mm
Espesor	h	10 mm
Diámetro mayor del tope de la ballesta	D	130 mm
Diámetro menor del tope de la ballesta	d	80 mm

$$m = 7,85 * \left((70 * 20 * (1100 + 840 + 650 + 370 + 180)) \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\pi}{4} * 18 * (130^2 - 80^2) \right) \right)$$

$$m = 0,036 T$$

Calculo de la masa de la ballesta prototipo II

Los datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo II, se presentan en la tabla 4.

Tabla 4

Datos para el cálculo de masa de la ballesta prototipo II.

Dato	Símbolo	Valor
Densidad del acero AISI 5160	δ	7,85 g/cm ³
Número de hojas de la ballesta	n	5
Longitud de la hoja 1	n_1	1120 mm
Longitud de la hoja 2	n_2	960 mm
Longitud de la hoja 3	n_3	800 mm
Longitud de la hoja 4	n_4	640mm
Longitud de la hoja 5	n_5	480 mm
Longitud de la hoja 6	n_6	320
Longitud de la hoja 6	n_7	160
Ancho de la ballesta	a	70 mm
Espesor	h	20 mm
Diámetro mayor del tope de la ballesta	D	130 mm
Diámetro menor del tope de la ballesta	d	80 mm

$$m = 7,85 * \left((40 * 10 * (1120 + 960 + 800 + 640 + 480 + 320 + 160)) + 2 \left(\frac{\pi}{4} * 18 * (130^2 - 80^2) \right) \right)$$

$$m = 0,022 T$$

Cálculo de ahorro económico

Los datos para el cálculo de ahorro económico entre la ballesta original del camión NLR y la ballesta prototipo II se presentan en la tabla 5.

Tabla 5

Datos para cálculo del porcentaje en ahorro.

Ballesta original del camión NLR	\$210,14
Ballesta prototipo II	\$132
Ahorro entre la ballesta original del camión NLR y la ballesta prototipo II	\$78,14

Nota: Los valores económicos fueron obtenidos de: proforma de Chevrolet y proforma de manufacturación para el prototipo II véase (anexo A).

$$\% \text{ de ahorro} = \frac{78,14 * 100\%}{210,14} = 37,2\%$$

Cálculo de deformación para obtener el porcentaje de error, comparando los resultados teóricos con los obtenidos en la simulación

En la tabla 6 se presenta los datos para calcular la deformación teórica y comprobarla con los resultados obtenidos de la deformación total obtenida de simulación en ANSYS véase (pág. 47).

Tabla 6

Datos para obtener el porcentaje de error entre lo analítico y lo simulado

Módulo de Elasticidad	190 - 210 GPa
Distancia entre los apoyos de la Ballesta	1120 mm
Ancho de la ballesta	40 mm
Espesor	10mm
Peso soportado por la ballesta	1800 kg

Deformación proporcionada por la simulación 73,4 mm

Diferencia entre el valor de la deformación teórica y la de la simulación. 1,9mm

$$\varnothing \text{ teórica} = \frac{1800 * 1120^3}{4 * (210000) * 40 * (10^3)} = 75.3 \text{ mm}$$

$$\% \text{ de error} = \frac{1,9 * 100\%}{75,3} = 2,52\%$$

Resultados

Para facilidad del análisis se han elaborado tablas de resultados de cada ballesta diseñada. Se presentan los resultados obtenidos de la ballesta original del camión NLR de configuración parabólica; segundo, se indicará los resultados del prototipo I de ballesta de configuración parabólica I con espesor y material diferente a la anterior; tercero, el análisis del prototipo II de ballesta con configuración recta o forma de trapecio con igual material que el prototipo I.

Cabe mencionar que cada prototipo está sometido a la misma condición de carga (18000N).

Ballesta camión NLR

Tabla 7.

Resultados obtenidos de la Ballesta original del camión NLR.

Ballesta camión NLR			
Dato	Valor	Unidad	Símbolo
Longitud de la ballesta desde los centros de apoyo	1050	Milímetros	mm
Número de hojas	5	N/A	n
Espesor de las hojas	18	Milímetros	e
Ancho de las hojas de la ballesta	70	Milímetros	a
Material		AISI 6150	
Configuración		Tipo parabólico	
Carga soportada por la ballesta	1800	Kilogramos	Kg
Fuerza aplicada	18000	Newton	N
Deformación Total	0,064	Milímetros	mm
Esfuerzo de Von-Misses	87,36	Mega Pascal	MPa
Factor de seguridad	2,86	N/A	

En la figura 26 se puede observar las zonas de deformación total de la ballesta del camión NLR a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

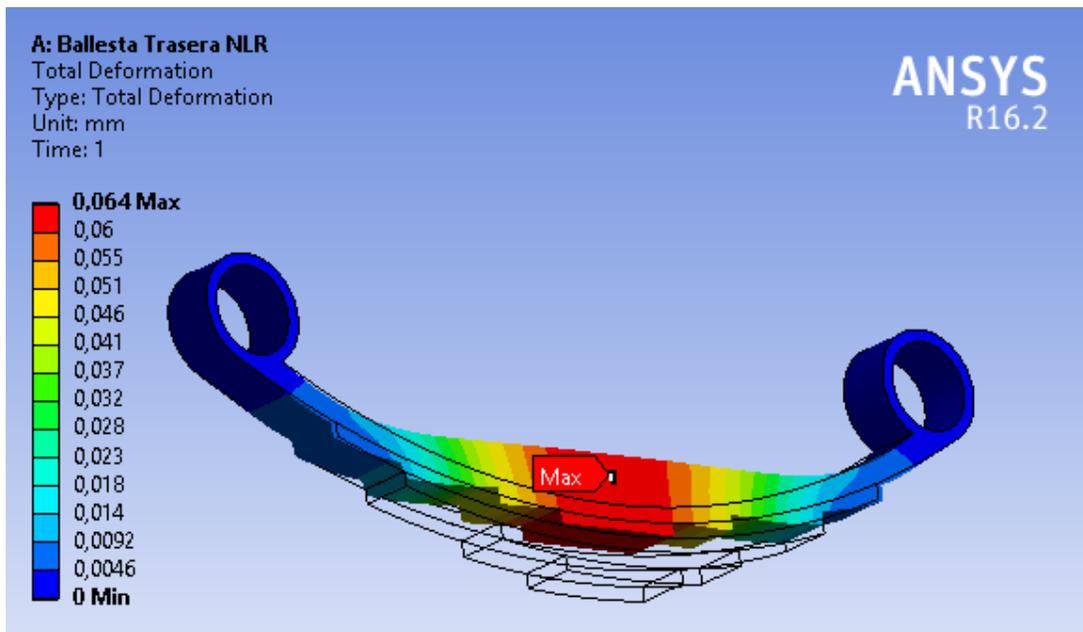


Figura 26. Resultados de deformación total de la ballesta original.

En la figura 27 se puede observar el esfuerzo de Von-Mises de la ballesta del camión NLR a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

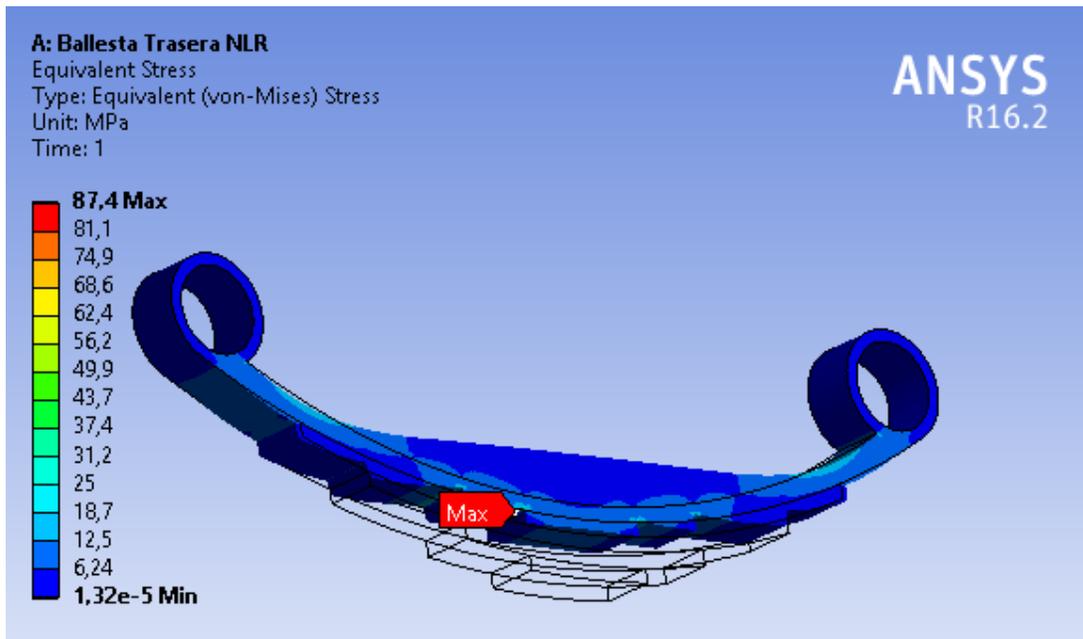


Figura 27. Esfuerzo de Von-Mises. Ballesta original.

En la figura 28, se puede observar la zona de deformación máxima en la ballesta del camión original.

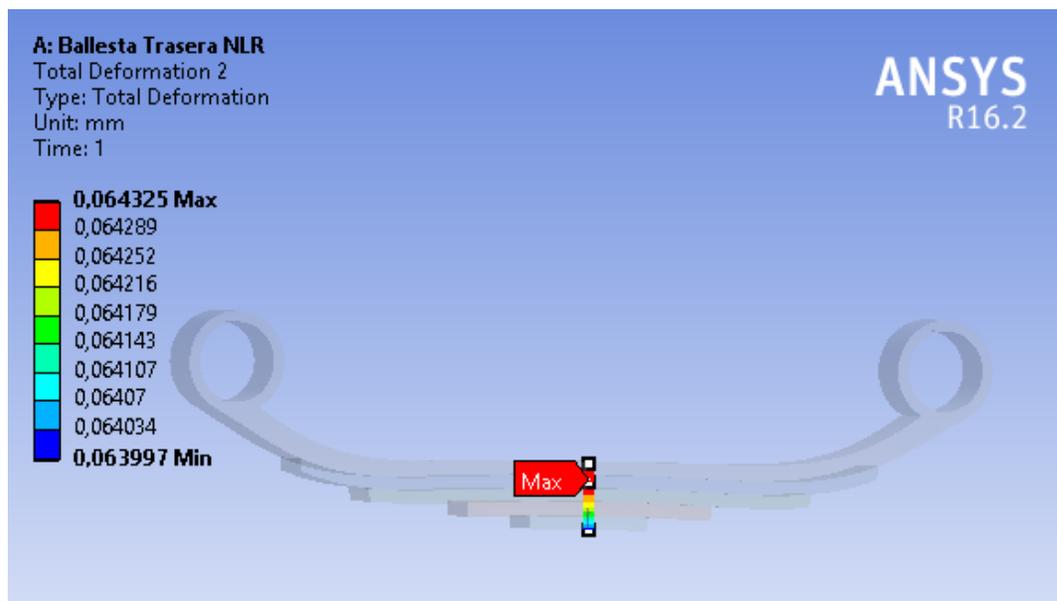


Figura 28. Zona de deformación máxima localizada en la ballesta original

En la figura 29, se puede observar la zona que posee el mayor esfuerzo (Von-Mises) en la ballesta del camión original.

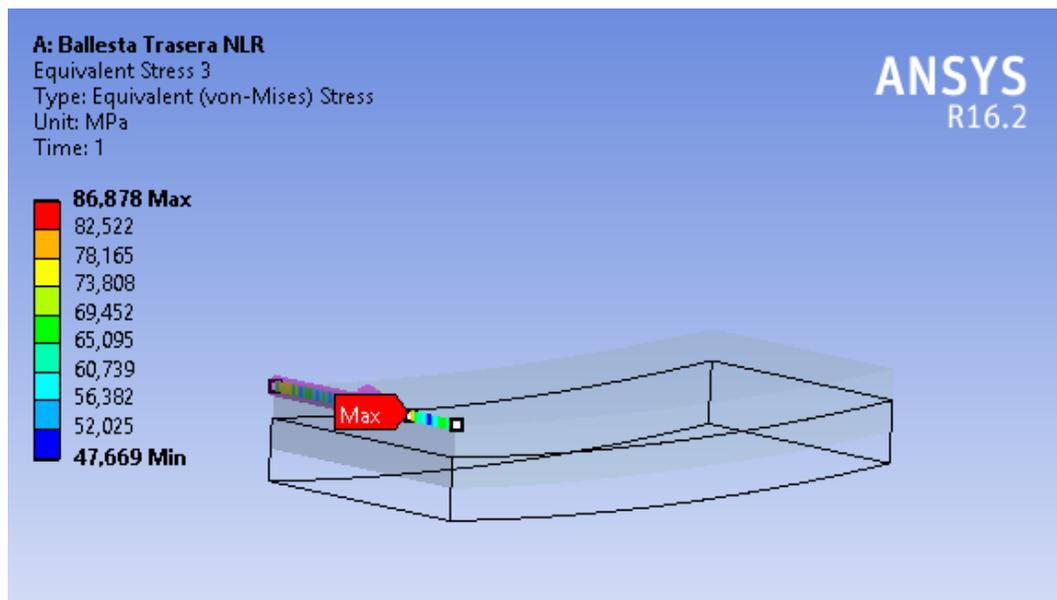


Figura 29. Zona de mayor esfuerzo localizado en la ballesta original

En la figura 30 se puede observar el factor de seguridad de la ballesta original a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

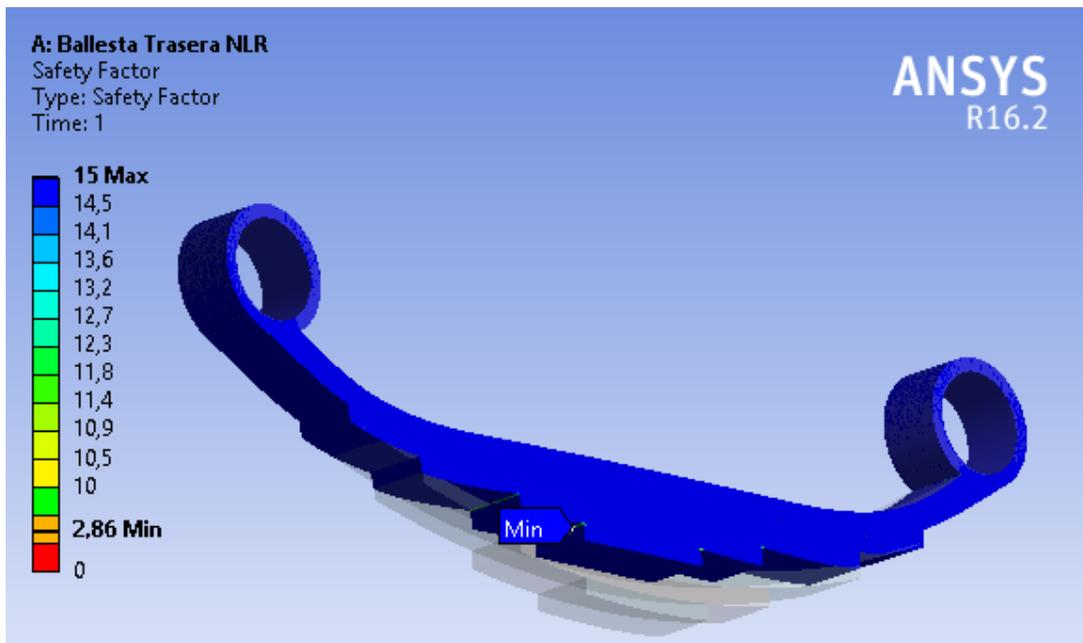


Figura 30. Factor de seguridad de la ballesta original.

En la figura 31 se observa la gráfica de la convergencia que presenta cuatro puntos correspondientes a la primera, segunda, tercera y cuarta simulación, en la última simulación se visualiza que la gráfica se estabiliza obteniendo un factor de seguridad de 2,86 correspondiente a la ballesta del camión NLR.

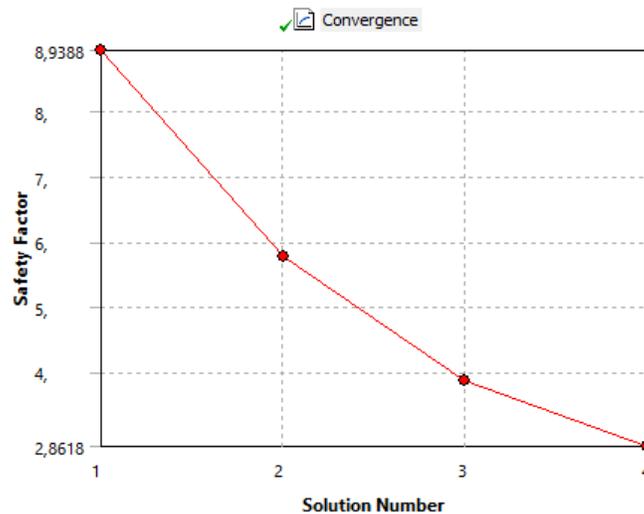


Figura 31. Gráfica de convergencia de la ballesta original.

Ballesta prototipo I

Tabla 8

Resultados obtenidos del prototipo I de ballesta para el camión NLR.

Ballesta prototipo I			
Dato	Valor	Unidad	Símbolo
Longitud de la ballesta desde los centros de apoyo	1100	Milímetros	mm
Número de hojas	5	N/A	n
Espesor de las hojas	20	Milímetros	e
Ancho de las hojas de la ballesta	70	Milímetros	a
Material	AISI 5160 Templado y Revenido		
Configuración	Tipo parabólico		
Carga soportada por la ballesta	1800	Kilogramos	Kg
Fuerza aplicada	18000	Newton	N
Deformación Total	0,05	Milímetros	mm
Esfuerzo de Von-Misses	84,02	Mega Pascal	MPa
Factor de seguridad	2,98	N/A	

En la figura 32 se puede observar la zona de deformación total del Prototipo I de la ballesta a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

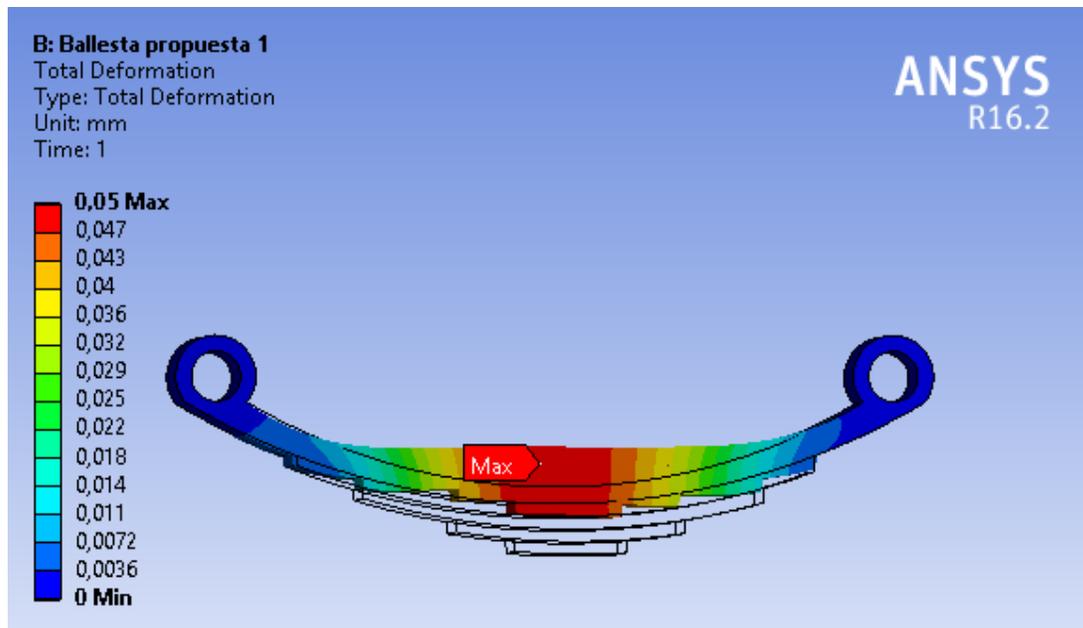


Figura 32. Deformación total de la ballesta prototipo I.

En la figura 33 se puede observar la zona del esfuerzo de Von-Mises del Prototipo I de la ballesta a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

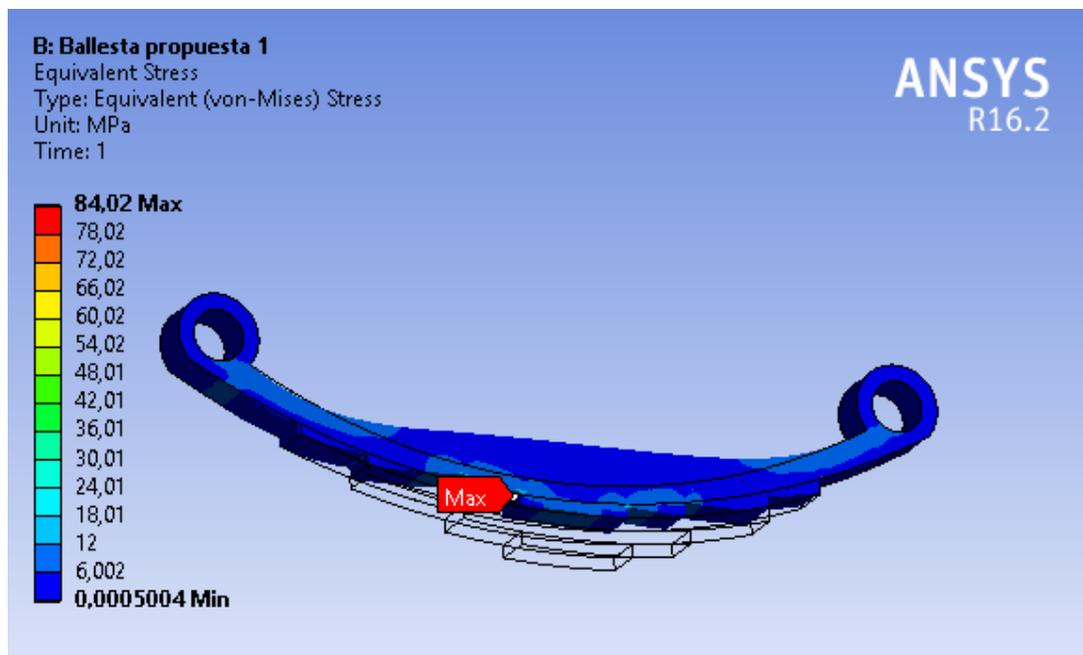


Figura 33. Esfuerzo de Von-Mises de la ballesta prototipo I.

En la figura 34, se puede observar la zona de deformación máxima en la ballesta prototipo I.

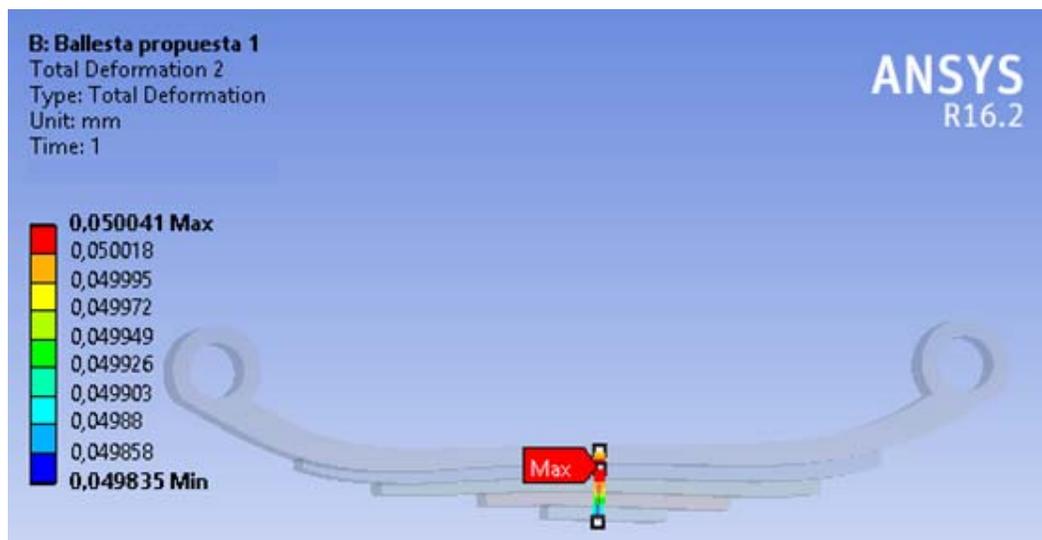


Figura 34. Zona de deformación máxima localizada en la ballesta prototipo I

En la figura 35, se puede observar la zona que posee el mayor esfuerzo (Von-Mises) en la ballesta prototipo I.

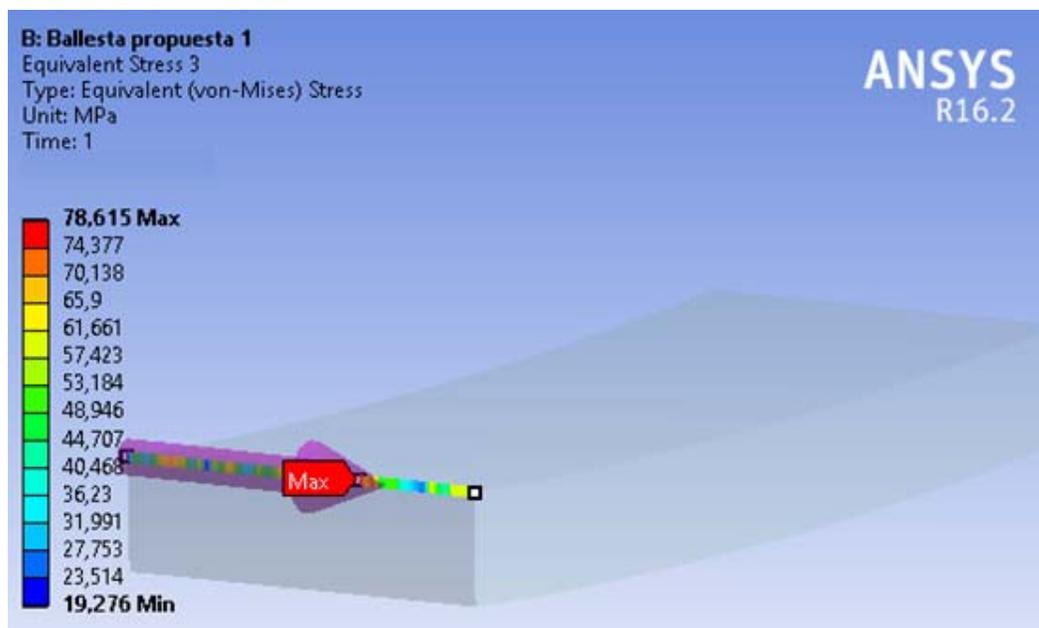


Figura 35. Zona de mayor esfuerzo localizado en la ballesta prototipo I

En la figura 36 se puede observar el factor de seguridad de la ballesta Prototipo I a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

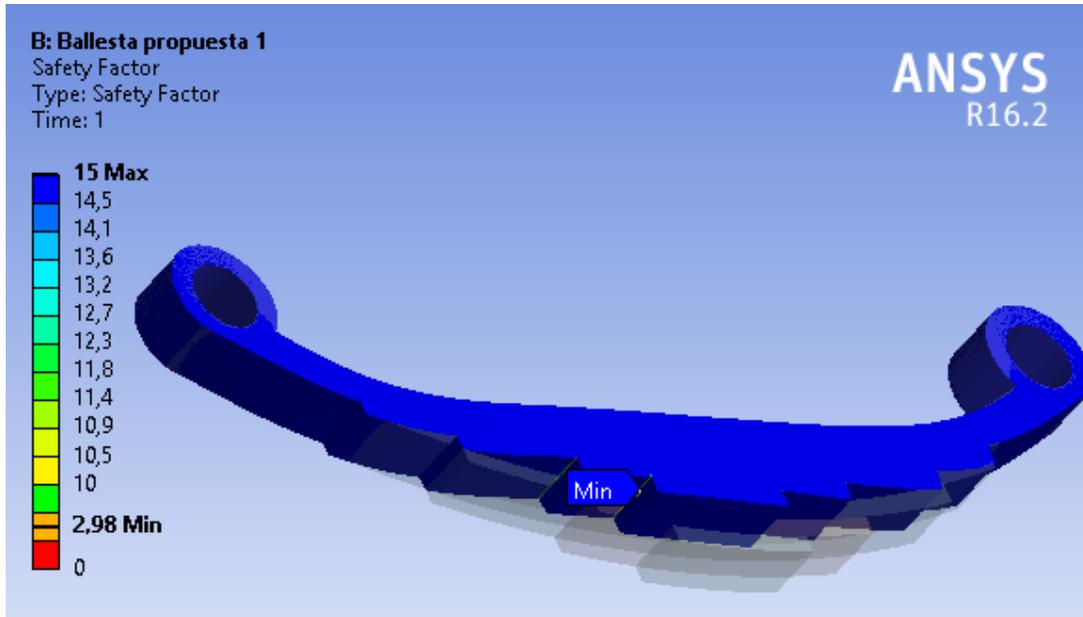


Figura 36. Factor de seguridad de la ballesta prototipo I

En la figura 37 se observa la gráfica de la convergencia que presenta cuatro puntos correspondientes a la primera, segunda, tercera y cuarta simulación, en la última simulación se visualiza que la gráfica se estabiliza obteniendo un factor de seguridad de 2,97 correspondiente a la ballesta prototipo I.

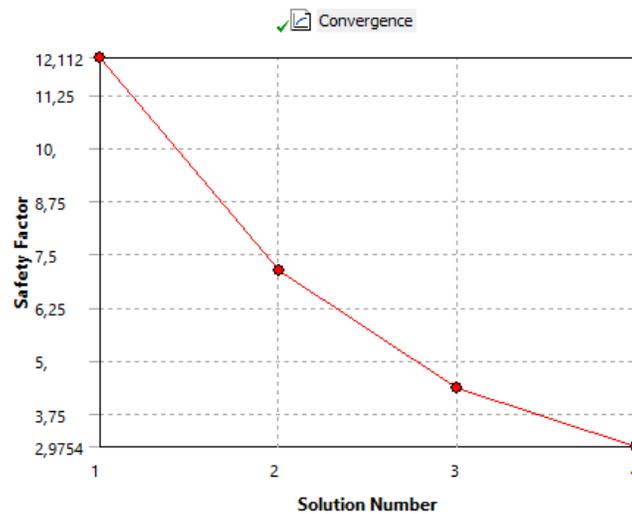


Figura 37. Gráfica de convergencia de la ballesta prototipo I.

Ballesta prototipo II

Tabla 9

Resultados obtenidos del prototipo II de ballesta para el camión NLR.

Ballesta prototipo II			
Dato	Valor	Unidad	Símbolo
Longitud de la ballesta desde los centros de apoyo	1120	Milímetros	mm
Número de hojas	7	N/A	n
Espesor de las hojas	10	Milímetros	e
Ancho de las hojas de la ballesta	40	Milímetros	a
Material	AISI 5160 Templado y Revenido		
Configuración	Tipo recta o forma de trapecio		
Carga soportada por la ballesta	1800	Kilogramos	Kg
Fuerza aplicada	18000	Newton	N
Deformación Total	1,84	Milímetros	mm
Esfuerzo de Von-Misses	655	Mega Pascal	MPa
Factor de seguridad	2,73	N/A	

En la figura 38 se puede observar la zona de deformación total de la ballesta Prototipo II a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

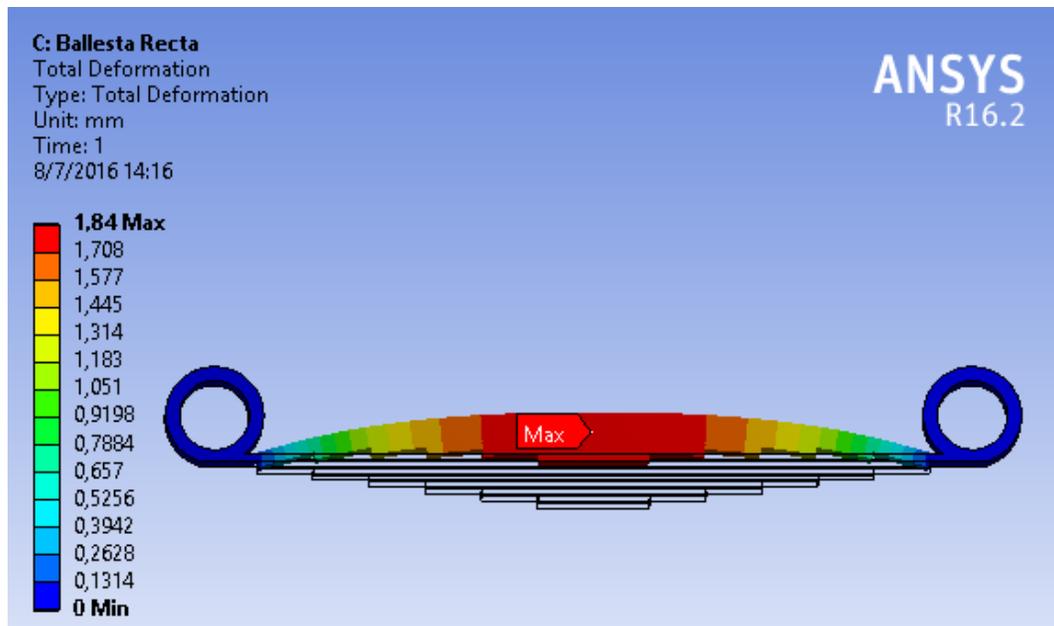


Figura 38. Deformación total de la ballesta prototipo II.

En la figura 39 se puede observar respectivamente las zonas de: deformación total y esfuerzo de Von-Misses de la ballesta Prototipo II a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

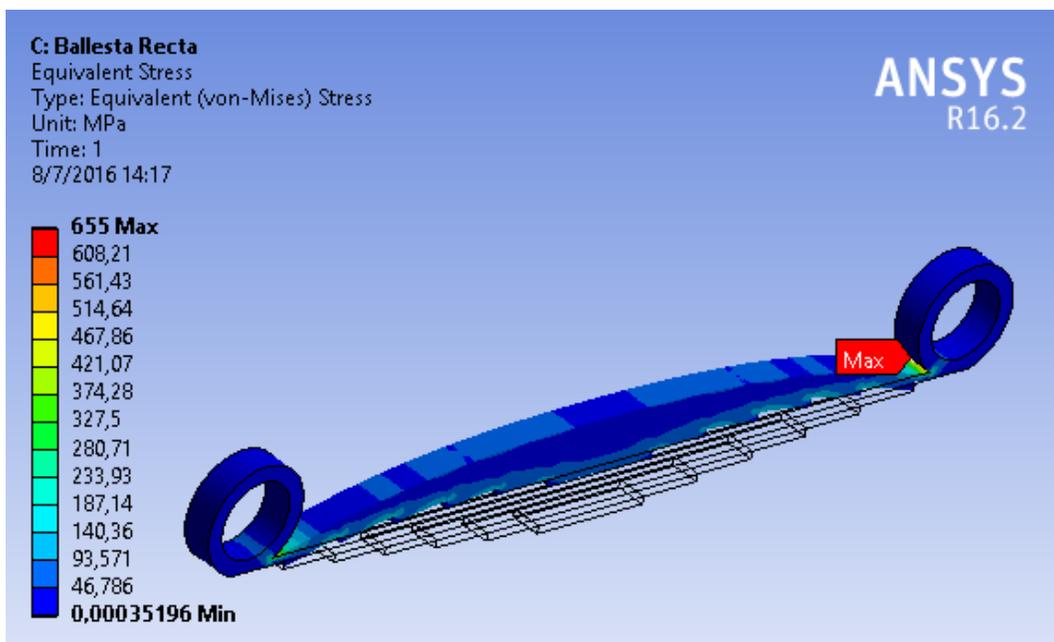


Figura 39. Esfuerzo de Von-Misses de la ballesta prototipo II.

En la figura 40, se puede observar la zona de deformación máxima en la ballesta prototipo II.

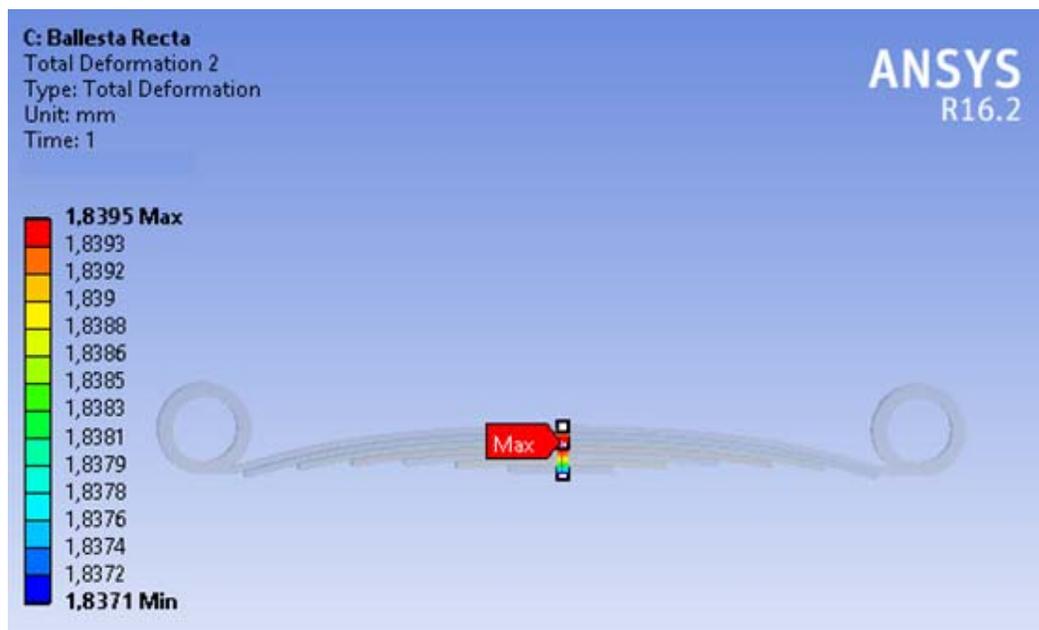


Figura 40. Zona de deformación máxima en la ballesta prototipo II

En la figura 41, se puede observar la zona que posee el mayor esfuerzo (Von-Mises) en la ballesta prototipo II.

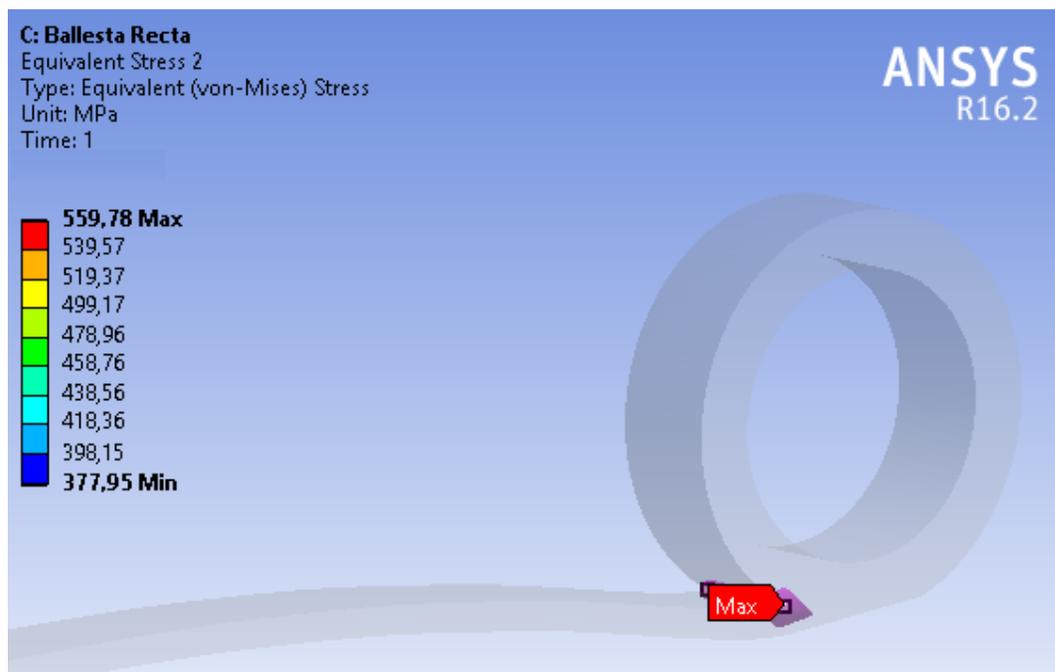


Figura 41. Zona de mayor esfuerzo en la ballesta prototipo II

En la figura 42 se puede observar el factor de seguridad de la ballesta Prototipo II a consecuencia de la carga aplicada (18000N).

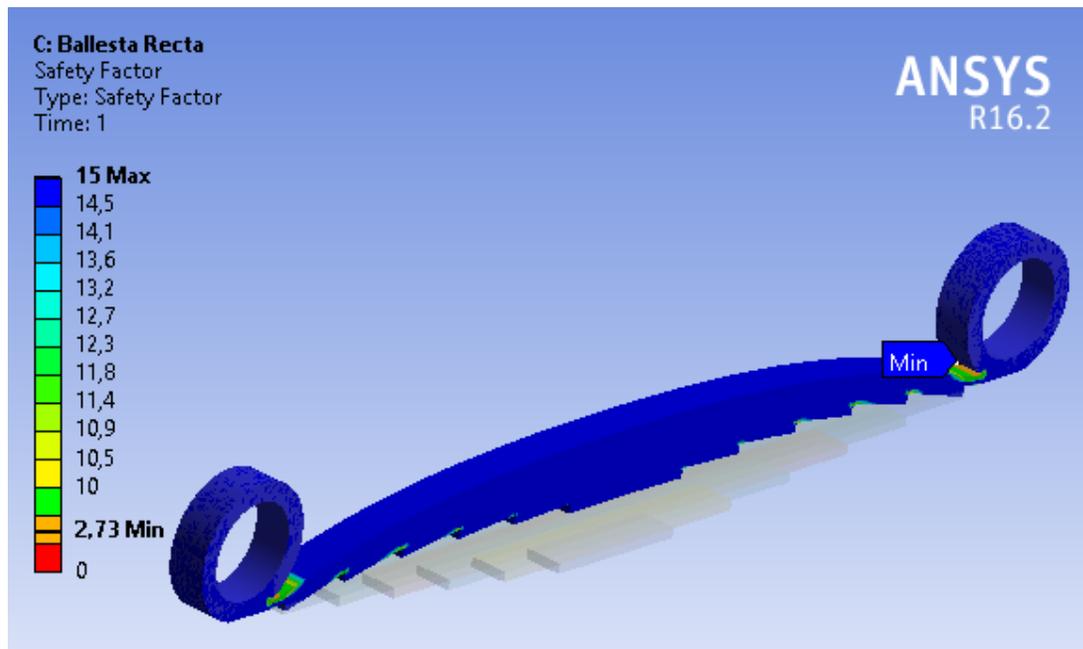


Figura 42. Factor de seguridad de la ballesta prototipo II.

En la figura 43 se observa la gráfica de la convergencia que presenta dos puntos correspondientes a la primera y segunda simulación, en la última simulación se visualiza que la gráfica se estabiliza obteniendo un factor de seguridad de 2,86 correspondiente a la ballesta prototipo II.

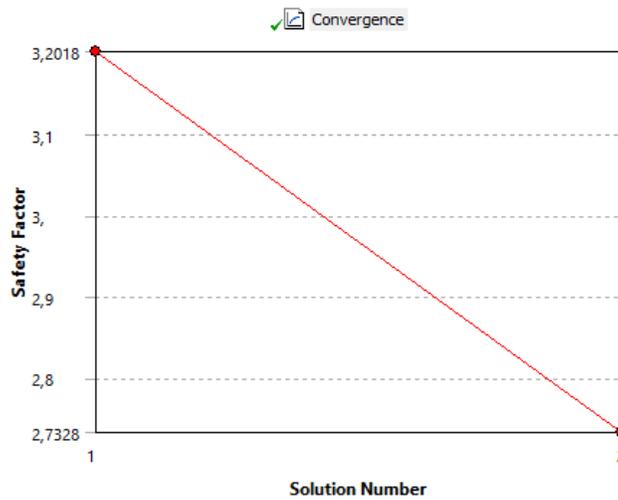


Figura 43. Gráfica de convergencia de la ballesta prototipo II.

En la figura 44, se puede visualizar el valor de la deformación total proporcionado por el software, para verificar el error entre: la simulación y lo teórico.

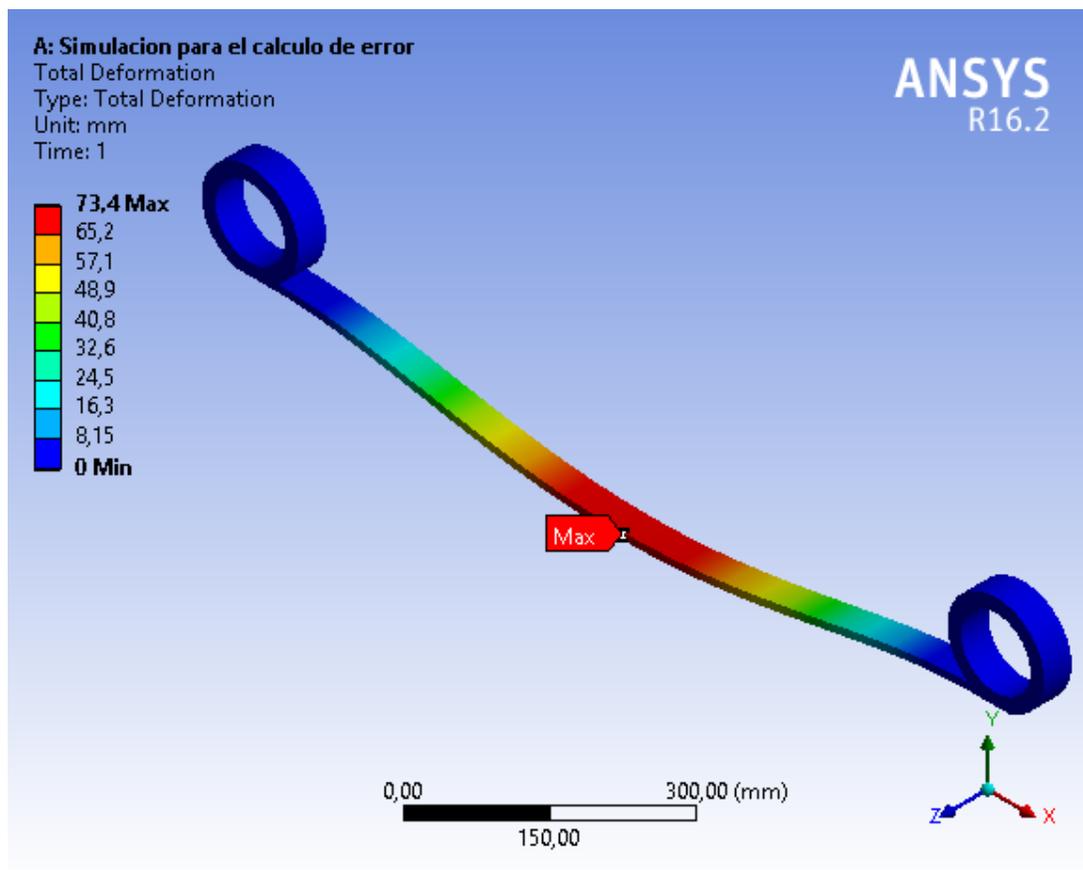


Figura 44. Gráfica de simulación para cálculo de error

Discusión

Los resultados obtenidos de la ballesta tipo parabólica del camión en estudio, que está hecha de un acero AISI 6150 (original de la casa comercial), presenta una resistencia a la fluencia de 415MPa como se puede observar en la (tabla A-2) que le proporciona a la misma un factor de seguridad de 2,86 que es superior en 3.5% a la normativa SAE J1123_199211, J1528_199006, la cual menciona que para ballestas de vehículos con un rango de carga de 1610kg – 1910Kg; el factor de seguridad debe oscilar entre 1.4 – 2.76.

Para que el prototipo I de la ballesta no afecte a las condiciones originales de carga (1800kg), fue necesario basarse en la normativa INEN 3017 vigente en el Ecuador que establece utilizar el acero AISI 5160 templado y revenido, que posee mejores propiedades mecánicas en cuanto a la resistencia a la fluencia en 76,82% y la resistencia a la tracción última en 69,82%, con relación al acero de fábrica del camión en estudio (véase tabla A-3).

En el prototipo I se mantuvo la misma configuración parabólica y el mismo número de hojas, variando el incremento en el espesor equivalente al 10% y en la longitud de la ballesta desde los centros de apoyo en 4,55% con respecto a la original, dando como resultado un valor de 0.05 mm de la deformación total (figura 45) y 84.02 MPa de esfuerzo de Von-Misses (figura 46); consecuentemente se obtuvo un factor de seguridad mayor equivalente al 4.02% sobre el modelo original, el cual fue corroborado con la gráfica de convergencia (figura 38) proporcionado por el software.

En lo que concierne al prototipo II se utilizó el mismo acero AISI 5160 templado y revenido por los motivos explicados en el párrafo anterior; la particularidad del prototipo II está en utilizar una configuración recta o también llamada forma de trapecio, sin embargo en el prototipo II se incrementó la longitud de la ballesta desde los centros de apoyo en 70mm y el número de hojas en 2; y se redujo el espesor en 8mm y el ancho en 30mm; lo que ocasiona un incremento en la deformación total en un 96.52% y en el esfuerzo de Von-Misses en

86.66% con relación a los valores de la ballesta original como se observa en las figuras 45 y 46, sin embargo vale destacar que el factor de seguridad de 2.73 y está dentro del rango de tolerancia establecido por la norma SAE. Dicho valor fue ratificado con la gráfica de convergencia (figura 43) que entregó el software.

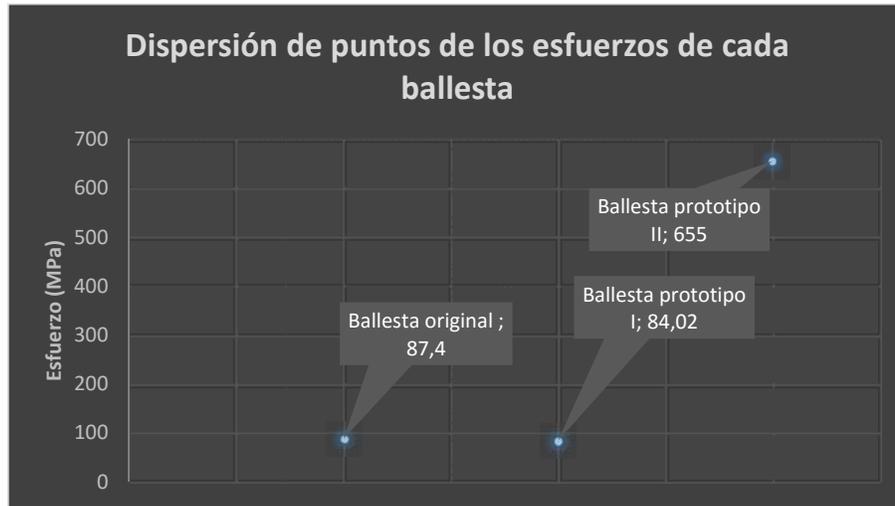


Figura 45. Dispersión de puntos de los esfuerzos de cada ballesta.

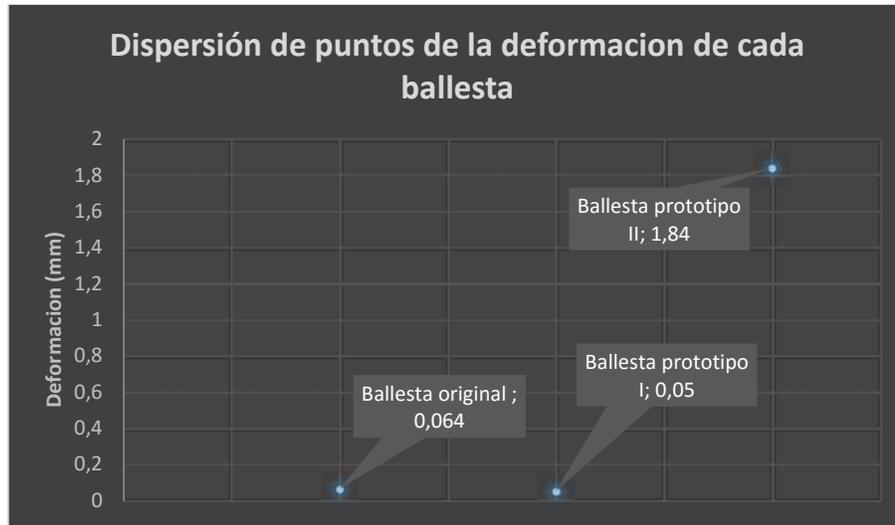


Figura 46. Dispersión de puntos de la deformación de cada ballesta.

Con el fin de verificar los resultados finales, se realizó una comparación entre los datos entregados por la simulación en ANSYS y los calculados teóricamente, obteniendo un porcentaje de error de 2.52% véase (pág. 36). Este porcentaje demuestra que las condiciones de contorno en las simulaciones realizadas, fueron las correctas.

Conclusiones:

El prototipo II de ballesta presenta ventajas frente a la ballesta original del camión en estudio en lo que se relaciona a la masa con una disminución del 31,25% y al costo económico con un ahorro del 37.2% véase (pág. 35); pues, se invierte menor cantidad de tiempo en la fabricación de cada una de las hojas que son de configuración recta; cabe mencionar que en Ecuador una de las empresas más reconocidas dentro del campo automotriz en la categoría de elementos flexibles es Vanderbilt, la cual prefiere manufacturar los productos con materiales existentes en el país y bajo normativa vigente siempre y cuando aseguren el cumplimiento de las condiciones de carga propias de cada vehículo.

El prototipo I de ballesta presenta un menor esfuerzo de Von-Misses con relación al prototipo II, con un factor de seguridad que sobrepasa en 7,4% del rango permitido, lo cual genera que la ballesta del prototipo I está sobredimensionada y por tanto tenga un mayor costo económico en comparación con el prototipo II.

Recomendaciones:

Realizar un análisis de fatiga propio de cada prototipo de ballestas, con el fin de determinar los ciclos de trabajo y el tiempo de vida del elemento. Adicionalmente es necesario realizar un análisis de costos en la manufacturación de los prototipos de ballestas propuestas en este estudio académico y así tener un mejor panorama sobre que prototipo de ballesta es más factible aplicar en beneficio de la economía del consumidor final.

También cabe mencionar que se debe tener un conocimiento previo acerca de: análisis de elementos finitos, condiciones de contorno, esenciales, naturales, frontera, mallado y convergencia para poder interpretar los resultados que se obtienen.

Referencias

- Ajay B.K., M. G. (Mayo de 2014). *Diseño y analisis de resortes multihoja con disposiciones de las diferentes hojas compuestas con hojas de acero*. Obtenido de Diseño y analisis de resortes multihoja con disposiciones de las diferentes hojas compuestas con hojas de acero: <http://www.ijettjournal.org/volume-11/number-2/IJETT-V11P217.pdf>
- Alonso, J. M. (2011). *Tecnicas del Automovil Chasis*. España: Paraninfo.
- Ashish V. Amrute, E. N. (Noviembre de 2013). *Diseño y evaluacion de resortes multi-hoja*. Obtenido de Diseño y evaluacion de resortes multi-hoja: www.ijrame.com/vol1issue7/V1i710.pdf
- AZOM. (11 de Junio de 2013). *AZO MATERIALES* . Obtenido de AZO MATERIALES : <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6743#5>
- Bello, M. A. (2011). *Circuitos de fluidos. Suspension y Direccion* . España: Paraninfo.
- Cadena, I. S. (02 de Mayo de 2016). Venta de repuestos originales chevrolet . (J. Tapia, Entrevistador)
- Cascajosa, M. (2005). *Ingenieria de Vehiculos* . Mexico: Alfaomega Grupo Editor .
- CHEVROLET. (13 de Abril de 2010). Manual Camiones Chevrolet Serie N. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Crouse, W. H. (1993). *Mecanica del Automovil II*. Barcelona : MARCOMBO, S.A.
- GTZ. (1985). *Tecnologia del Automovil Tomo 2*. Barcelona : Reverte .
- INEN. (10 de Junio de 2015). *NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 3017*. Obtenido de NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 3017: <http://www.normalizacion.gob.ec/>
- Manosalvas, H. (02 de Mayo de 2016). Informe Cambio de Ballestas. 3. (J. Tapia, Entrevistador) Quito: Chevrolet.
- Martinez, G. (2000). *Manual Practico del Automovil* . España: Cultural .

Mott, L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Mexico : Pearson .

Pankaj Saini, A. G. (05 de Mayo de 2013). *Diseño y analisis de resorte de lámina compuestos para vehiculos ligeros*. Obtenido de Diseño y analisis de resorte de lámina compuestos para vehiculos ligeros:
http://www.ijirset.com/upload/may/12_DESIGN.pdf

RNA. (16 de Octubre de 2013). *Rassini-NHK*. Obtenido de Rassini-NHK :
http://www.rassini-nhk.com.br/rna_es/produtos/nhk

Rodríguez, A. M. (Noviembre de 2010). *Simulación mediante MEF de una estructura metalica*. Obtenido de Simulación mediante MEF de una estructura metalica :
http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11571/PFC_Adrian_Martin_Rodriguez.pdf?sequence=1

SAE. (21 de Noviembre de 1992). *SAE Standards*. Obtenido de SAE Standards:
<http://ww.sae.org/automotive/standards>

Shigley. (2008). *Diseño en Ingenieria Mecanica*. Mexico: Mc Graw Hill.

Sowjanya, U. R. (01 de Marzo de 2013). *DISEÑO Y ANÁLISIS DE AUTOMOCIÓN MULTI-USO DE MUELLES DE HOJA*. Obtenido de DISEÑO Y ANÁLISIS DE AUTOMOCIÓN MULTI-USO DE MUELLES DE HOJA:
https://www.researchgate.net/publication/235956901_Design_and_analysis_of_automotive_multi-leaf_springs_using_composite_materials

Toyota . (2003). *Manual Sistema de Suspension*. Quito: Toyota .

Universidad de Talca. (2002). *Uso y Aplicaciones Básicas de Elementos Finitos, Usando el software ANSYS*. Obtenido de Uso y Aplicaciones Básicas de Elementos:
http://dSPACE.UTALCA.CL:8888/ingenieria/alarcon_constanzo_campos.pdf

Universidad Tecnologica de Pereira . (18 de Agosto de 2011). *Universidad Tecnologica de*

Perreira/ Investisciones . Obtenido de Universidad Tecnologica de Perreira/

Investisciones : <http://www.utp.edu.co/~lvanegas/disI/Apendices>

Vanderbilt. (23 de Junio de 2016). Proforma . Quito, Pichincha , Ecuador .

Vanegas, L. (16 de Junio de 2008). *Universidad Tecnologica de Pereira* . Obtenido de

Universidad Tecnologica de Pereira :

<http://www.utp.edu.co/investigacion/documentos/lvanegas.pdf>

Anexo ATabla A-1. *Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 5160.*

Propiedades físicas	Métrico	Imperial	
Densidad	7,85 g / cm ³	0,284 lb / ³	
Propiedades mecánicas		Métrico	Imperial
Resistencia a la tracción, último		724 MPa	105000 psi
Resistencia a la fluencia, tracción		275 MPa	39900 psi
Módulo de elasticidad		190-210 GPa	27557-30458 ksi
Módulo volumétrico (típico de acero)		140 GPa	20300 ksi
Módulo de corte (típico de los aceros)		80 GPa	11600 ksi
El coeficiente de Poisson		0,27 - 0,30	0,27-0,30
Alargamiento a la rotura (en 50 mm)		17.20%	17.20%
Dureza, Brinell		197	197
Dureza, Knoop (conversión de dureza Brinell)		219	219
Dureza, Rockwell B (conversión de dureza Brinell)		92	92
Dureza, Rockwell C (convertida de dureza Brinell, valor por debajo del rango normal HRC, exclusivamente a efectos comparativos)		13	13
Dureza Vickers (conversión de dureza Brinell)		207	207

Fuente: (AZOM, 2013)

Tabla A-2. *Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 6150.*

Propiedades físicas	Métrico	Imperial
Densidad	7,85 g / cm ³	0,284 lb / ³
Propiedades mecánicas	Métrico	Imperial
Resistencia a la tracción, último	670 MPa	97200 psi
Resistencia a la fluencia, tracción	415 MPa	60200 psi
Impacto Izod	27 J	19.9 ft-lb
Módulo de elasticidad	190-210 GPa	27557-30458 ksi
Módulo de corte (típico de acero)	80 GPa	11600 ksi
Módulo volumétrico (típico de acero)	140 GPa	20300 ksi
Relación de Poisson (calculado)	0,27 - 0,30	0,27-0,30
Alargamiento a la rotura (en 50 mm)	23%	23%
Dureza, Brinell	197	197
Dureza Vickers (conversión de dureza Brinell)	207	207
Dureza, Knoop (conversión de dureza Brinell)	219	219
Dureza, Rockwell B (conversión de dureza Brinell)	92	92
Dureza, Rockwell C (convertida de dureza Brinell, valor por debajo del rango normal HRC, exclusivamente a efectos	13	13

Fuente: (AZOM, 2013)

Tabla A-3. *Propiedades del Acero AISI 5160 Templado y revenido.*

Material		Resistencia de fluencia en tracción S_y (0.2%)		Esfuerzo último en tracción S_u		Elongación (en 2 in)	Dureza Brinell
SAE/AISI	Estado	ksi	MPa	ksi	MPa	%	HB
5160	Recocido	40	276	105	724	17	197
	Templado y revenido @ 1300 °F	100	690	115	793	23	229
	Templado y revenido @ 1000 °F	151	1040	170	1170	14	341
	Templado y revenido @ 700 °F	237	1630	263	1810	9	514
	Templado y revenido @ 400 °F	260	1790	322	2220	4	627

Fuente: (Universidad Tecnológica de Pereira , 2011).

Tabla A-4. *Proforma de la ballesta del camión NLR.*

Proforma de la Ballesta del Camión NLR		
Ítem	Valor Unitario	Valor Total(incluido IVA)
1) Ballesta trasera camión NLR	\$180.72	\$210.14

Fuente: (CHEVROLET, 2010)

Nota: El valor del ítem está sujeto a cambios por temas de impuestos debido a las importaciones.

Tabla A-5. *Proforma de fabricación de los prototipos I y II.*

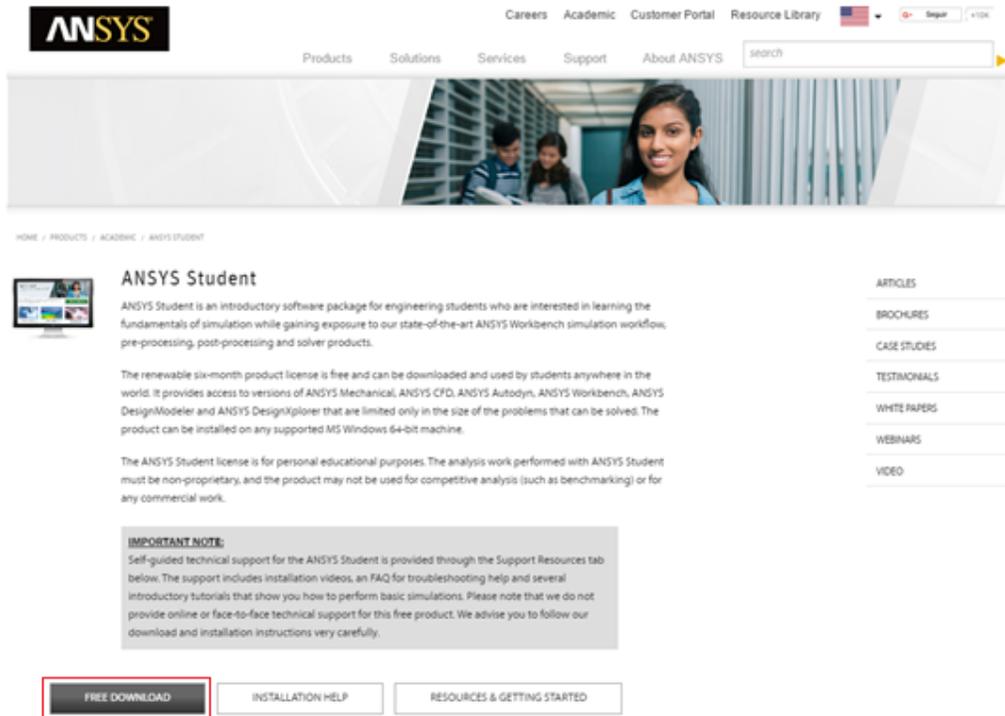
Proforma de la fabricación de los prototipos I y II de Ballestas		
Ítem	Valor Unitario	Valor Total (incluido IVA)
1) Ballesta de configuración parabólica (Prototipo I)	\$132	\$150.48
2) Ballesta de configuración recta (Prototipo II)	\$113.52	\$132

Fuente: (Vanderbilt, 2016).

Nota: La proforma representa un costo aproximado de la fabricación de los prototipos.

Tabla A-6 *Número de nodos en cada una de las simulaciones de las ballestas.*

Número de nodos en cada una de las simulaciones de las ballestas		
Ballesta original del camión NLR		
Número de simulaciones	Número de nodos	Número de elementos de la malla
1era	120367	22736
2da	186420	100725
3era	430950	268295
4ta	905291	596500
Ballesta Prototipo I configuración parabólica		
Número de simulaciones	Número de nodos	Número de elementos de la malla
1era	77079	14322
2da	316316	156303
3era	609961	344378
4ta	1059540	656031
Ballesta Prototipo II configuración recta		
Número de simulaciones	Número de nodos	Número de elementos de la malla
1era	261326	49110
2da	368119	194962



ANSYS

Careers Academic Customer Portal Resource Library US Support +104

Products Solutions Services Support About ANSYS

HOME / PRODUCTS / ACADEMIC / ANSYS STUDENT

ANSYS Student

ANSYS Student is an introductory software package for engineering students who are interested in learning the fundamentals of simulation while gaining exposure to our state-of-the-art ANSYS Workbench simulation workflow, pre-processing, post-processing and solver products.

The renewable six-month product license is free and can be downloaded and used by students anywhere in the world. It provides access to versions of ANSYS Mechanical, ANSYS CFD, ANSYS Autodyn, ANSYS Workbench, ANSYS DesignModeler and ANSYS DesignXplorer that are limited only in the size of the problems that can be solved. The product can be installed on any supported MS Windows 64-bit machine.

The ANSYS Student license is for personal educational purposes. The analysis work performed with ANSYS Student must be non-proprietary, and the product may not be used for competitive analysis (such as benchmarking) or for any commercial work.

IMPORTANT NOTE:
Self-guided technical support for the ANSYS Student is provided through the Support Resources tab below. The support includes installation videos, an FAQ for troubleshooting help and several introductory tutorials that show you how to perform basic simulations. Please note that we do not provide online or face-to-face technical support for this free product. We advise you to follow our download and installation instructions very carefully.

FREE DOWNLOAD INSTALLATION HELP RESOURCES & GETTING STARTED

ARTICLES
BROCHURES
CASE STUDIES
TESTIMONIALS
WHITE PAPERS
WEBINARS
VIDEO

Figura 47. Software ANSYS con licencia libre.

Anexo B



Quito – Ecuador

**NORMA
TÉCNICA
ECUATORIANA**

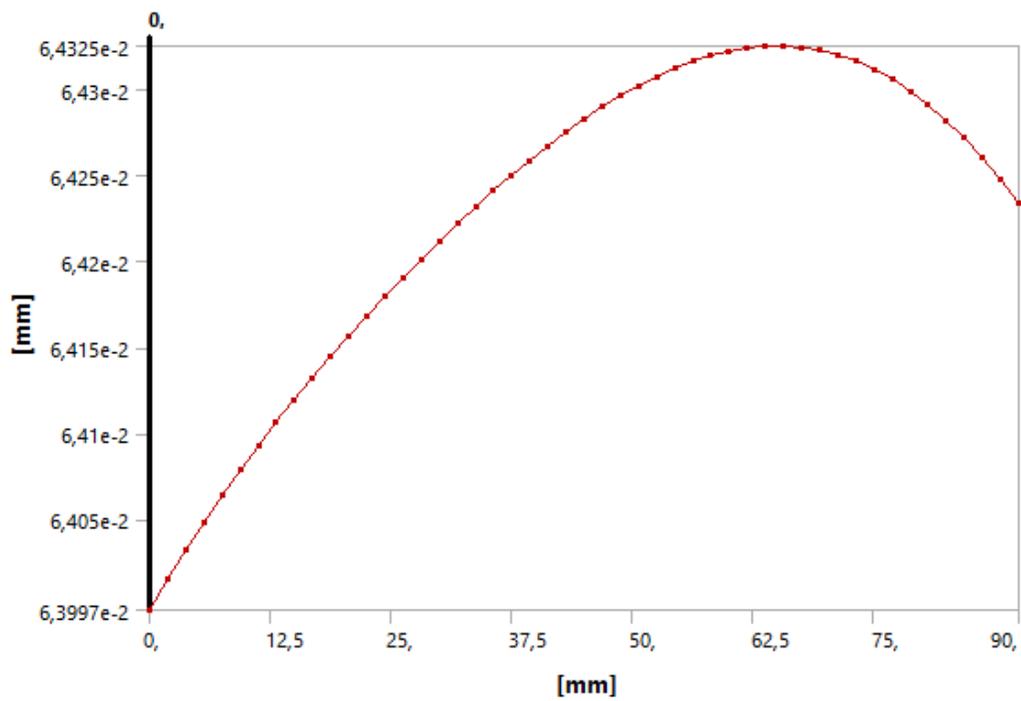
NTE INEN 3017

**BALLESTAS Y HOJAS PARA SUSPENSIÓN EN VEHÍCULOS
AUTOMOTORES. REQUISITOS E INSPECCIÓN**

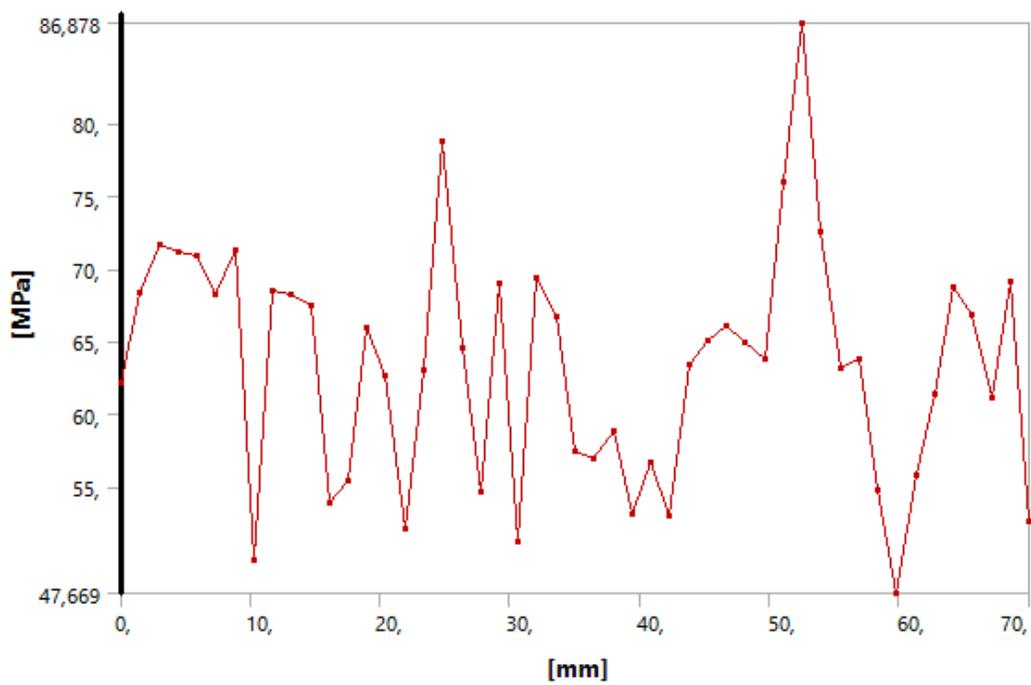
**BALLESTAS SUSPENSION AND LEAVES FOR MOTOR VEHICLES. REQUIREMENTS AND
INSPECTION**

Anexo C

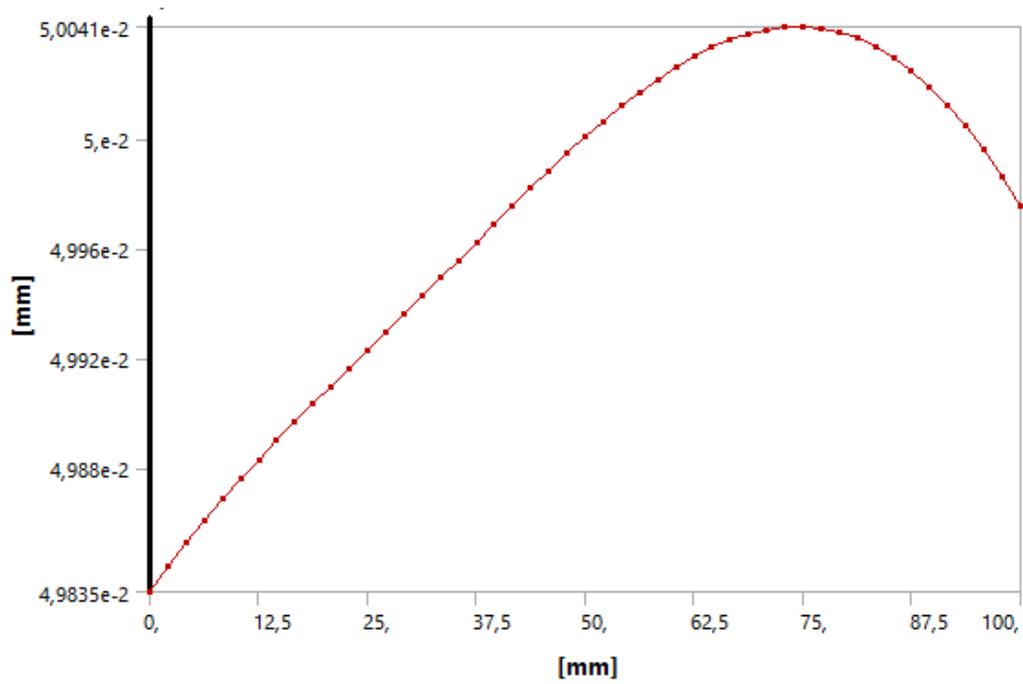
Grafica C-1. Deformación total de la ballesta del camión NLR.



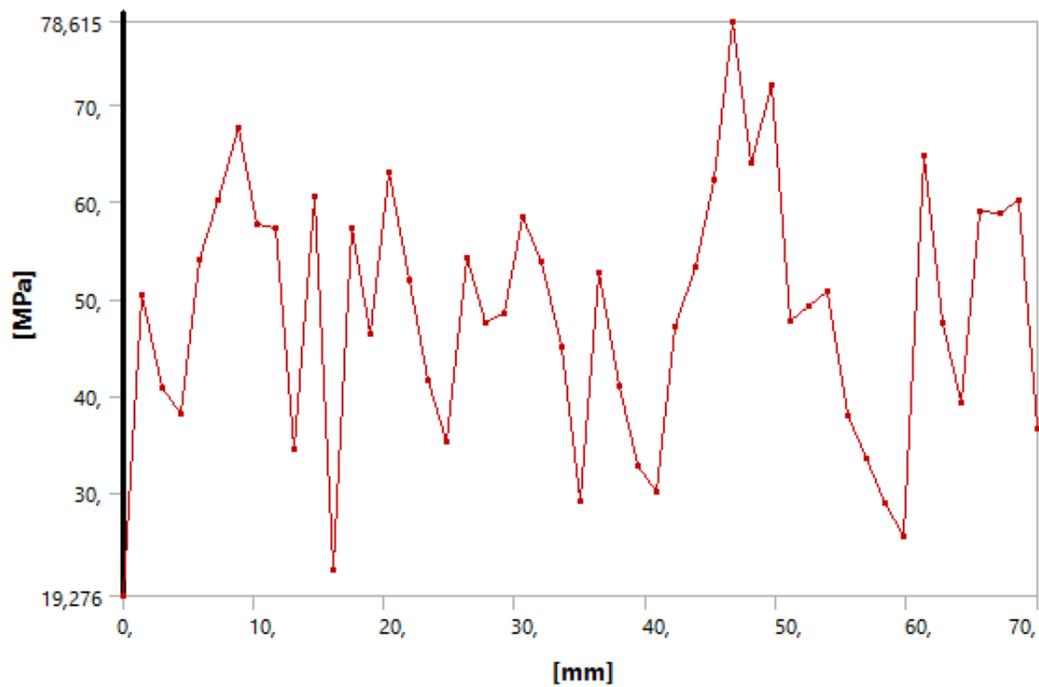
Grafica C-2. Esfuerzo de Von-Mises de la ballesta original del camión NLR.



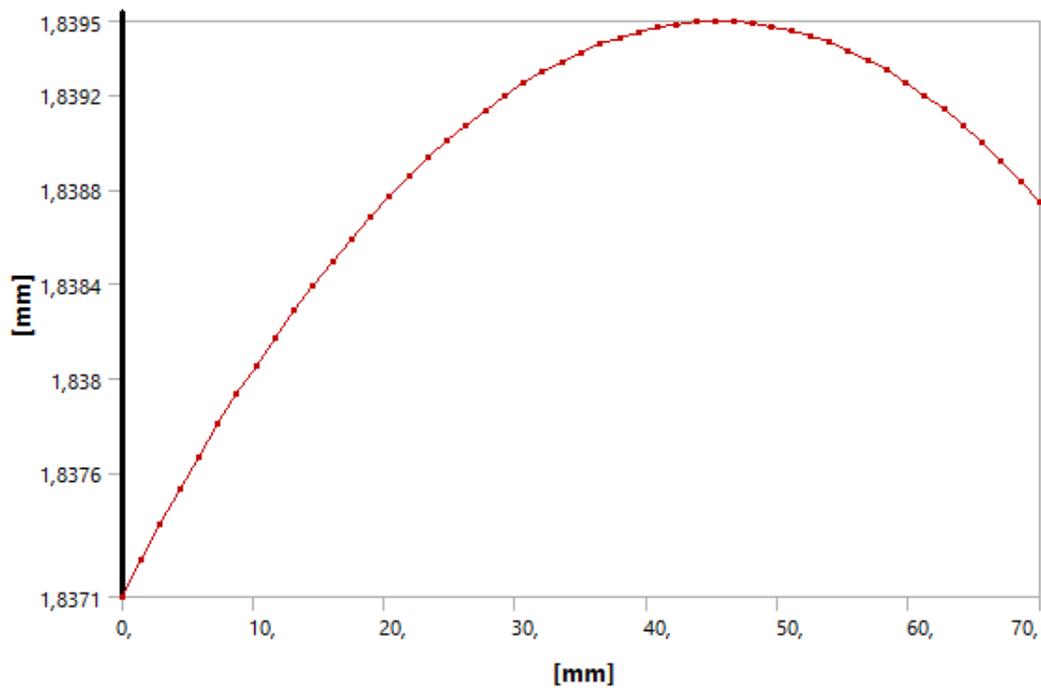
Grafica C-3. Deformación total del Prototipo I de ballesta.



Grafica C-4 Esfuerzo de Von-Misses del Prototipo I de ballesta.



Grafica C-5. Deformación total del Prototipo II de ballesta.



Grafica C-6. Esfuerzo de Von-Misses del Prototipo II de ballesta.

