

03-050

Design and optimization of a novel design of agricultural implement for grain movement by means of the FEM

Hugo Malón; Jesús Cuartero; Francisco Javier Garcia-Ramos; Mariano Vidal; Antonio Bone
Universidad de Zaragoza;

The machine analyzed in this study is an agricultural implement used to stack cereals in order to optimize the storage area and to move cereals in order to avoid high temperature focuses. These focuses can generate the proliferation of mycotoxins caused by the presence of fungi in cereals. One of the most susceptible cereals is maize.

The lattice mast structure of these agricultural implements has a satisfactory structural behavior when pushing the cereal. The problem occurs when a implement pushes the cereal at the same time that the tractor are turning. At this moment the mast structure is subjected to a bending effort. This effort has not been considered in most current designs.

This study shows the work carried out in order to analyze and optimize an agricultural implement design for cereals movement. Concretely, in this paper the research group shows the numerical optimization developed by means of numerical analyses based in the Finite Element Method.

Keywords: Agricultural implement; design; optimization; FEM

Diseño y optimización de un nuevo modelo de remontador de cereal mediante el MEF

Los remontadores de cereal son aperos agrícolas destinados a mover cereales, con el fin de optimizar el espacio de almacenaje y evitar focos de temperatura elevados que den lugar a la proliferación de micotoxinas originadas por la presencia de hongos en los cereales, principalmente en el maíz.

El diseño en forma de celosía del mástil de estos aperos agrícolas presenta un comportamiento estructural muy satisfactorio al empujar el cereal, pero el problema se plantea cuando al mismo tiempo que empujan el cereal el apero se desplaza lateralmente. En este momento el mástil trabaja a flexión, esfuerzo que no se ha considerado en la mayoría de diseños actuales.

El objetivo del artículo es mostrar el trabajo realizado en el diseño y optimización de un nuevo modelo de remontador de cereal. En concreto se mostrará el trabajo de optimización realizado mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos.

Palabras clave: Remontador de cereal; apero agrícola; diseño; optimización; FEM

Correspondencia: Hugo Malón hml@unizar.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Los remontadores de cereal son aperos agrícolas destinados a amontonar cereales con el fin de optimizar el espacio de almacenaje y removerlos para evitar focos de temperatura elevados que den lugar a la aparición de micotoxinas originadas por la presencia de hongos en los cereales, siendo uno de los más susceptibles el maíz.

Según el Reglamento (CE) N° 1234/2007, se establece un contenido máximo de humedad para el maíz del 13'5% como criterio de calidad para su uso en el sector agroalimentario.

Tras la cosecha, el maíz llega al secadero con un exceso de humedad, por lo que es necesario proceder a reducir su contenido de agua hasta reducirla al 13'5% tal y como dicta la normativa europea.

Almacenar grano con un alto contenido de humedad, sin una buena aireación y sin un manejo correcto puede ocasionar la aparición de plagas de insectos y problemas fúngicos importantes como las micotoxinas de *Fusarium*; principalmente las aflatoxinas, cuya aparición está regulada por el Reglamento (CE) N° 466/2001 de la Comisión, de 8 de marzo de 2001, por el que se fija el contenido máximo de éstos contaminantes en los productos alimentarios.

El diseño en forma de celosía del mástil de estos aperos agrícolas, mostrado en la figura 1, presenta un comportamiento estructural muy satisfactorio al empujar longitudinalmente el cereal. El problema se plantea cuando el apero además de empujarlo tiene que girar desplazando el cereal en una dirección con cierto ángulo respecto al eje longitudinal del apero. En este momento el mástil trabaja a flexión, esfuerzo que no se ha considerado en la mayoría de diseños actuales.

Figura 1: Ejemplo de remontador de cereal (Sicilia (2015))



El objetivo del artículo es mostrar el trabajo realizado en el análisis y optimización de un nuevo modelo de remontador de cereal. En concreto se mostrará el trabajo de optimización realizado mediante técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos.

2. Objetivo

El principal objetivo del estudio es el diseño y optimización de la estructura resistente de remontador de cereal de cuatro metros de longitud.

En el proceso de análisis se emplearán técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos, las cuales permitirán simular los casos de carga típicos de este tipo de aperos. Las simulaciones numéricas permitirán analizar el comportamiento según criterios de rigidez y resistencia de los componentes de la estructura del remontador, facilitando el proceso de optimización de los mismos.

Como objetivo secundario se contempla la reducción de masa del diseño inicial, mediante la aplicación de perfiles comerciales. Con el fin de ahorrar en costes de fabricación se impone que la totalidad de las diagonales, así como el marco delantero han de ser diseñados con el mismo tipo de perfil. Análogamente los cuatro largueros longitudinales también se fabricarán de un perfil comercial de las mismas características, el cual será diferente del perfil de las diagonales.

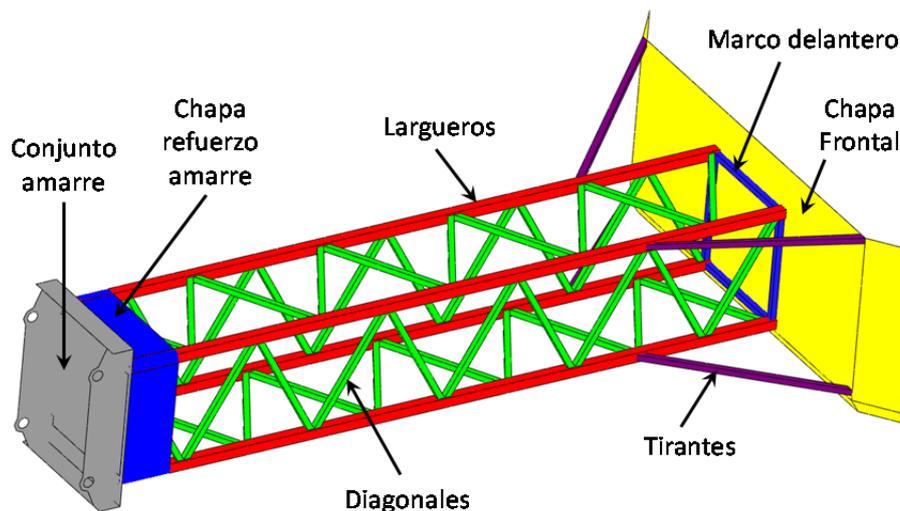
3. Análisis numérico de un remontador de cereal

El análisis numérico mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica aplicada frecuentemente en el análisis estructural de chasis de semirremolques, camiones, maquinaria y aperos agrícolas (Beermann, (1984); Kodiyalam & Sobieszczanski-Sobieski, (2001); Karaoglu & Kuralay, (2002); Cappello et al, (2005); Li et al, (2007); Carrera et al, (2010); Miralbes, & Castejon, (2010); Deng et al, (2011); Hoefinghoff et al, (2011); Miralbes, Malon & Castejon (2011); Vidal et al, (2011); Malón et al (2014)).

En el presente estudio se ha empleado la citada técnica numérica en el diseño y optimización de la estructura resistente de un remontador de cereal.

Los casos de carga analizados corresponden a maniobras habituales a las cuales está sometido un apero agrícola de estas características, y que corresponden con las maniobras críticas desde el punto de vista resistente de su estructura.

Figura 2: Modelo de remontador de cereal



3.1 Descripción del modelo de remontador a analizar

El remontado de cereal que se analiza en el estudio consiste en una estructura metálica, formada por una celosía central, equipada con una cuchara de empuje ubicada en su extremo y un conjunto de amarre que permite el acople del apero a un tractor o vehículo pesado. La figura 2 muestra el modelo inicial a analizar así como sus principales componentes.

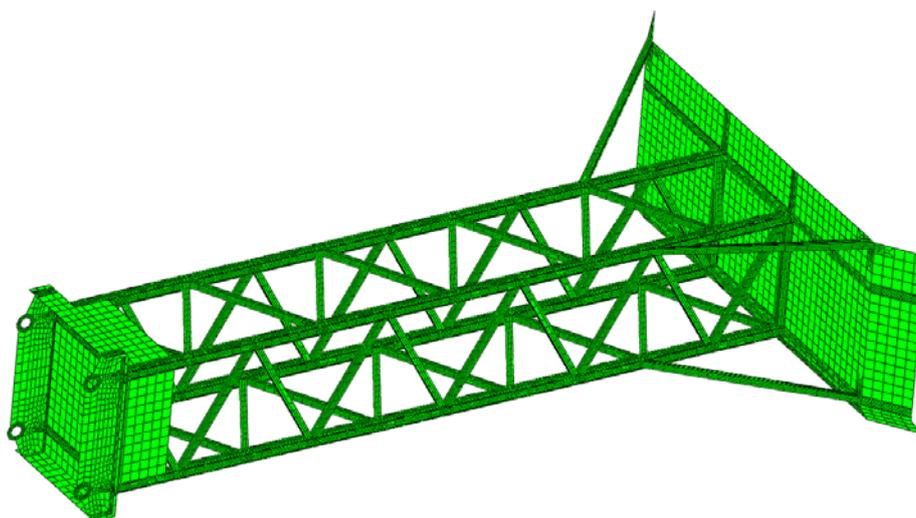
3.2 Modelo de elementos finitos

En el proceso de diseño y optimización de un remontador de cereal ha sido desarrollado un modelo de elementos finitos, el cual se muestra en la figura 2.

La discretización del modelo se ha realizado a partir de una configuración de celosía tradicional, estructura empleada extensamente en este tipo de apero agrícola. El modelo completo de elementos finitos, está formado por 25.020 nodos y 26.190 elementos.

La totalidad de los elementos empleados en la discretización de la estructura resistente del remontador de cereal son elementos tipo lamina (*Shell*).

Figura 3: Modelo de elementos finitos del remontador de cereal

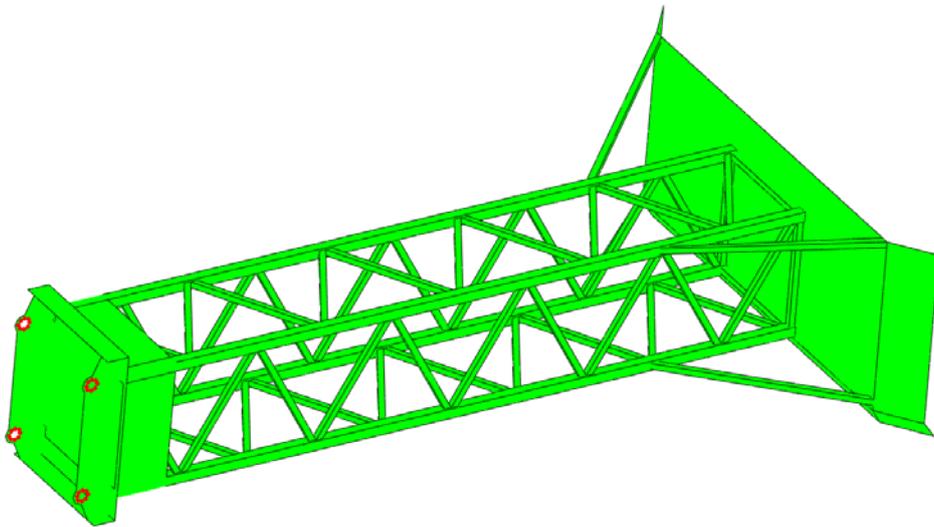


Los materiales empleados en el análisis numérico basado en el Método de los Elementos Finitos son los aceros S275-JR en el modelo inicial y aceros S275JR y S355JR en el modelo optimizado. Las propiedades mecánicas de estos aceros han sido obtenidas de la norma EN 10025-2006. Como se ha indicado en el modelo inicial, a la totalidad de los componentes se les ha asignado las propiedades mecánicas del acero S275JR. Mientras que en el modelo optimizado a la totalidad de los componentes se les han aplicado propiedades mecánicas del acero S275JR, a excepción de los largueros, a los cuales se les ha asignado propiedades de acero S355JR.

3.3 Condiciones de contorno

Con el fin de reproducir el comportamiento del remontador de cereal en las maniobras a simular, se han impuesto una serie de condiciones de contorno que reproducen las existentes en la realidad. Concretamente se han restringido los desplazamientos en los bulones de amarre del apero con el tractor o vehículo pesado en el cual se acopla, reproduciendo con ello el amarre real de este tipo de aperos. La zona en la cual se han restringido los desplazamientos se muestra en rojo en la figura 4.

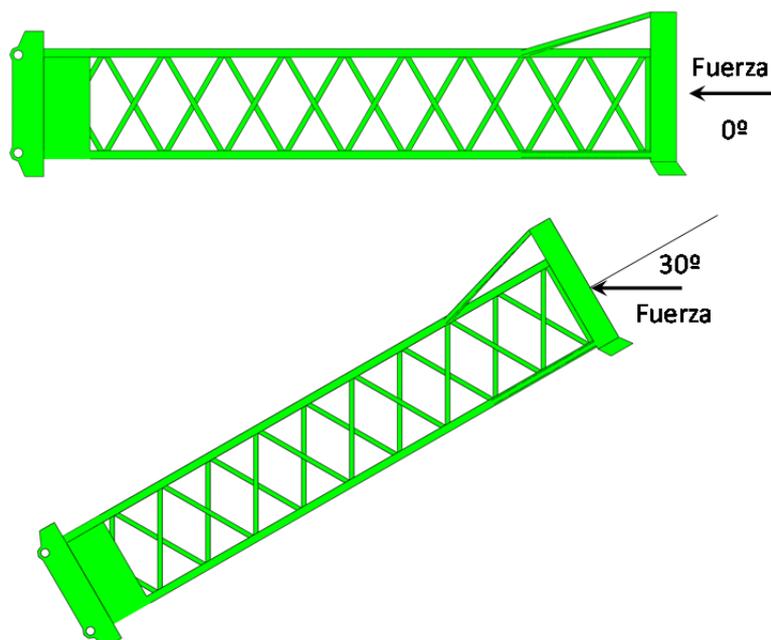
Figura 4: Restricción de desplazamientos en el modelo numérico



3.4 Casos de carga

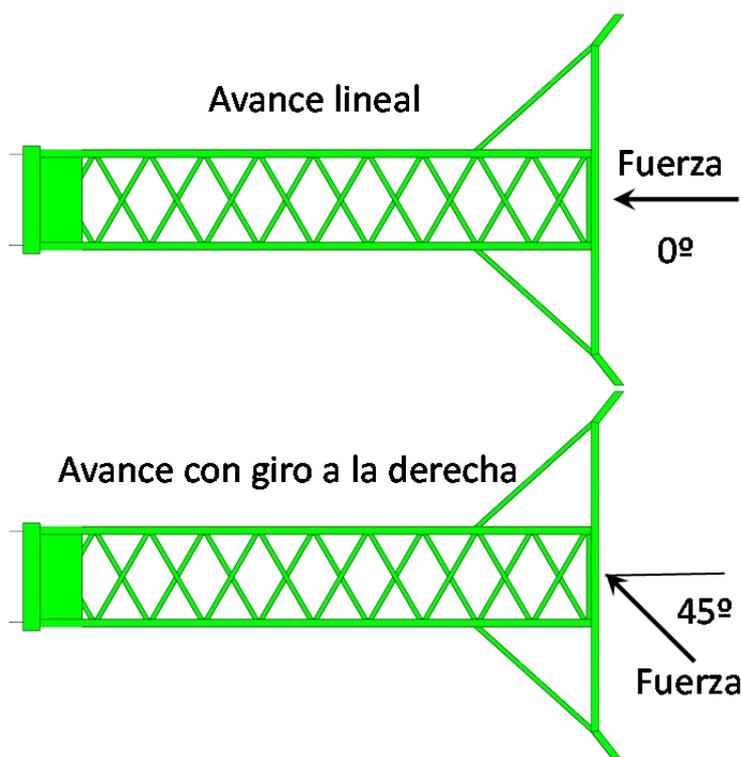
Los casos de carga analizados en el proceso de diseño y optimización del chasis corresponden al caso de carga en el cual el remontador empuja el cereal almacenado en montones. La carga máxima aplicada sobre la chapa frontal del remontador es de 12.000N (Sicilia (2015)), pudiendo variar la inclinación del remontador desde 0° (empuje horizontal) hasta los 30° , al tener que empujar maíz almacenado en montones con una inclinación de 25° , ángulo de reposo del maíz (FAO (1991)). Los modelos en función de su inclinación se muestran en la figura 5.

Figura 5: Inclinación de los modelos y aplicación de la carga en el caso de avance lineal (vista lateral)



En referencia la dirección de la fuerza han sido consideradas tres situaciones. En la primera de ellas se simula el empuje que hace el remontador al avanzar el tractor de forma rectilínea, por lo que la fuerza aplicada es perpendicular a la chapa frontal. En segundo lugar se pretende simular la situación en la cual además de avanzar el remontador, este gira hacia la derecha, por lo que la dirección de la fuerza aplicada en la chapa frontal tiene un ángulo de 45° respecto de la normal de la chapa y su sentido es opuesto al sentido de giro del remontador. De forma simétrica se simula el caso en el cual el remontador avanza al mismo tiempo que gira a la izquierda. En la figura 6 se muestran el sentido de las fuerzas en los casos de avance lineal y avance con giro a la derecha.

Figura 6: Sentido de las fuerzas en los casos de carga (vista superior)



Debido a las dos inclinaciones a estudiar (0° y 30°) y las tres direcciones de la fuerza (avance lineal, avance con giro a derecha y avance con giro a izquierda) en el estudio se han analizado seis casos de carga, los cuales son:

- Remontador horizontal con avance lineal
- Remontador horizontal con giro a la derecha
- Remontador horizontal con giro a la izquierda
- Remontador inclinado 30° con avance lineal
- Remontador inclinado 30° con giro a la derecha
- Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda

4. Resultados del análisis numérico

Una vez que el modelo de elementos finitos de la estructura resistente inicial del remontador de cereal a analizar ha sido realizado, se procede a realizar los cálculos numéricos de los casos de carga a estudiar.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos mediante el Método de los Elementos Finitos del diseño inicial del apero agrícola a estudio, así como los resultados finales del proceso de optimización realizado hasta obtener un diseño óptimo para un remontador de cereal.

En el proceso de optimización desarrollado ha sido realizado mediante el criterio de resistencia fundamentalmente, sin soslayar el criterio de rigidez.

4.1 Diseño inicial

Una vez realizados los cálculos numéricos del modelo inicial, se procede a analizar los resultados obtenidos de la estructura resistente del remontador con el fin de optimizar la geometría de sus componentes.

Los cálculos numéricos realizados proporcionan, entre otros resultados las tensiones equivalentes de Von Mises, así como los desplazamientos del modelo global analizado y de cada uno de sus componentes por separado.

La figura 7 muestra las tensiones equivalentes obtenidas en el caso de carga “Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda”, el cual es el más crítico a nivel global desde el punto de vista resistente. En referencia a los desplazamientos, en la figura 8 se muestran a modo de ejemplo los desplazamientos longitudinales obtenidos en el remontador en el caso de carga “Remontador horizontal con giro a la derecha”. Los desplazamientos obtenidos en la totalidad de los casos de casos de carga son pequeños y no representan ningún problema ante un análisis de rigidez del apero.

Figura 7: Tensiones de Von Mises en el caso de carga “Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda”

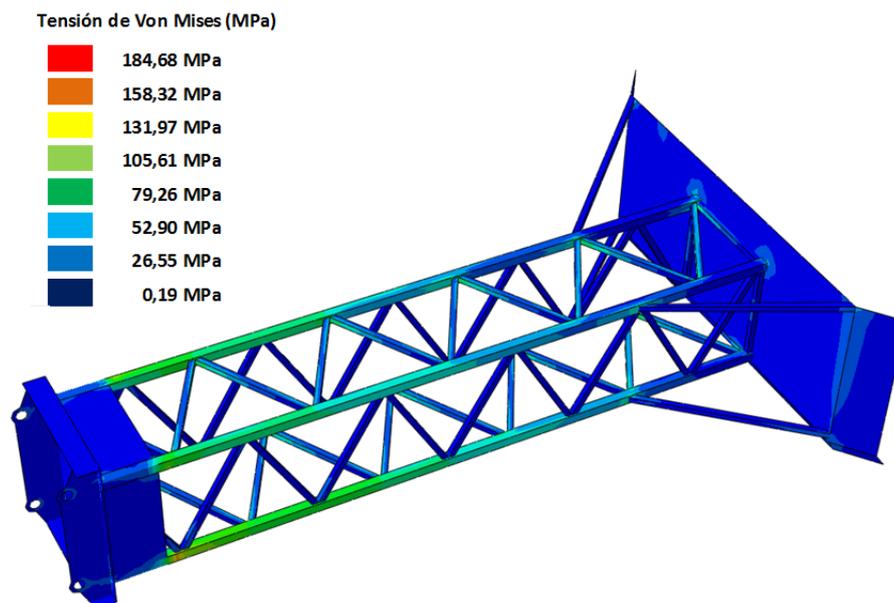
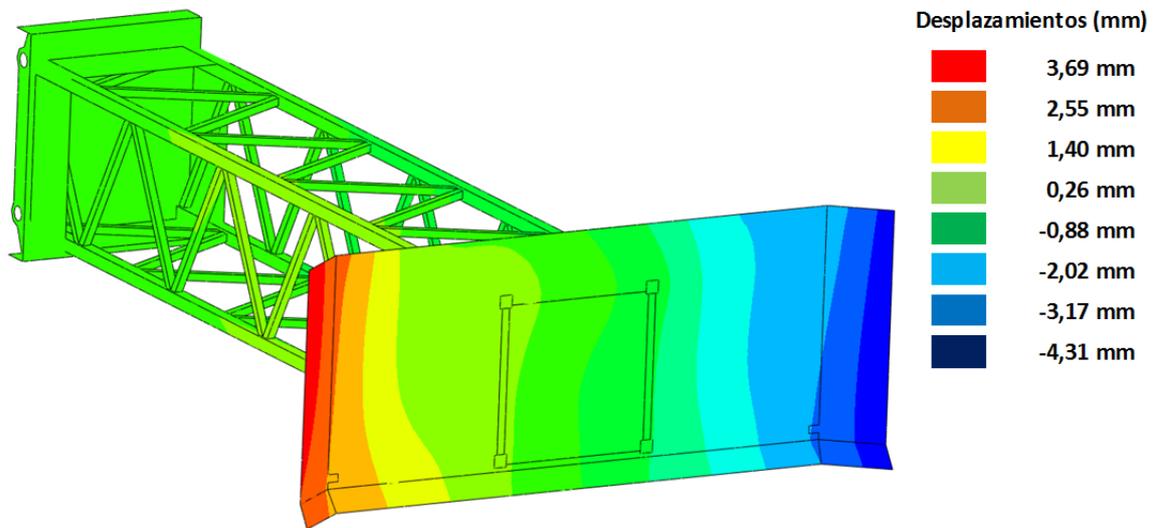


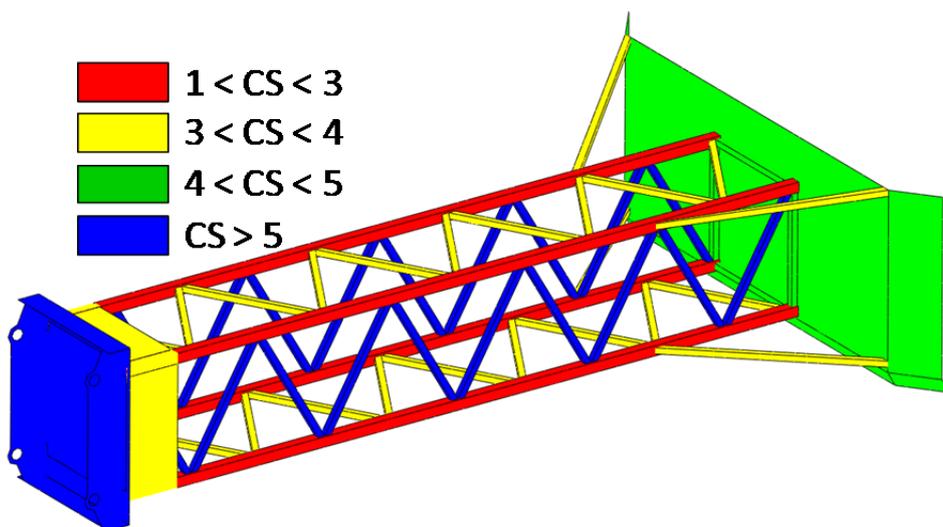
Figura 8: Desplazamientos longitudinales en el caso de carga “Remontador horizontal con giro a la derecha”



Al analizar las tensiones equivalentes de Von Mises obtenidas de los seis casos de carga han sido localizadas dos zonas críticas en la estructura resistente, ambas situadas en los largueros del remontador. La primera de ellas se localiza en los largueros inferiores, concretamente en la unión del tirante inferior derecho y la diagonal inferior con el citado larguero. El segundo punto crítico se localiza en los largueros superiores en la zona en la cual finaliza la chapa de refuerzo del amarre, siendo más crítica en la unión de la diagonal superior con el larguero.

Con el fin de agilizar el proceso de optimización, en la figura 9 se muestra una imagen en la que se representa por colores el coeficiente de seguridad mínimo en cada componente del remontador inicial para la totalidad de los casos de carga.

Figura 9: Coeficientes de seguridad mínimos en los componentes del remontador

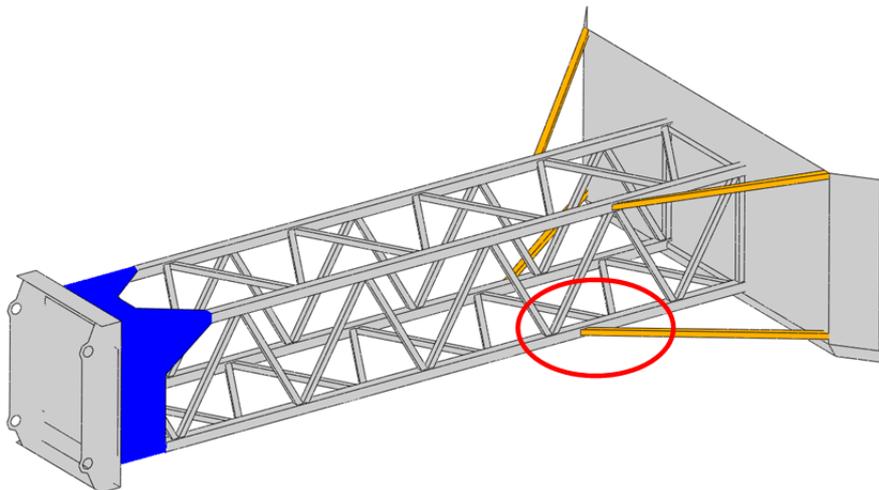


4.2 Diseño optimizado

Una vez han sido analizados los resultados obtenidos de los cálculos numéricos de la estructura resistente inicial del remontador se procede con el proceso de optimización del mismo.

Para ello se trabaja analizando los componentes en función del coeficiente de seguridad mínimo obtenido en el estudio del modelo inicial. En referencia a los componentes con coeficiente de seguridad inferior a 3 (en rojo en la figura 9), se ha observado que las tensiones máximas obtenidas son reales y se han propuesto dos modificaciones geométricas con el fin de solucionar las concentraciones de tensiones observadas. En referencia a los largueros inferiores, se ha desplazado la unión de los tirantes inferiores con los largueros a una zona existente entre la segunda unión de la diagonal inferior con el larguero izquierdo y la segunda unión de las diagonales laterales izquierdas con el citado larguero. Esta modificación se muestra con un círculo rojo en la figura 10. La segunda modificación es la variación geométrica de la forma de la chapa de refuerzo del amarre, la cual se presenta en la figura 9 en azul.

Figura 10: Modificaciones geométricas del modelo de remontador



En relación a los perfiles que componen la celosía central, se ha reducido el espesor de los perfiles que conforman la totalidad de las diagonales, así como los tirantes y el marco delantero. Por otro lado se ha aumentado el espesor de los perfiles longitudinales, al mismo tiempo que se sustituye el acero S275JR por acero S355JR en los mismos. Con estas modificaciones se cumple el objetivo secundario de mantener la homogeneidad de perfiles comerciales en los elementos estructurales. Para finalizar también se ha reducido el espesor de las chapas que conforman el conjunto de amarre.

Las modificaciones realizadas en el proceso de optimización permiten reducir la masa del modelo en 13,77kg, lo que supone una reducción del 3,80% de la masa con respecto del modelo inicial.

Las figuras 11-16 muestran una comparativa de los resultados obtenidos de tensiones de Von Mises de los casos de carga más representativos, como son "Remontador horizontal con avance lineal", "Remontador horizontal con giro a la derecha" y "Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda", siendo este último el más crítico según el criterio de resistencia para los modelos analizados de remontador de cereal. Con el fin de analizar mejor las tensiones generadas, en las imágenes no se representa la chapa frontal, la cual no presentaba problemas según el criterio de resistencia, como se ha observado del análisis inicial.

Figura 11: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Remontador horizontal con avance lineal" del modelo inicial

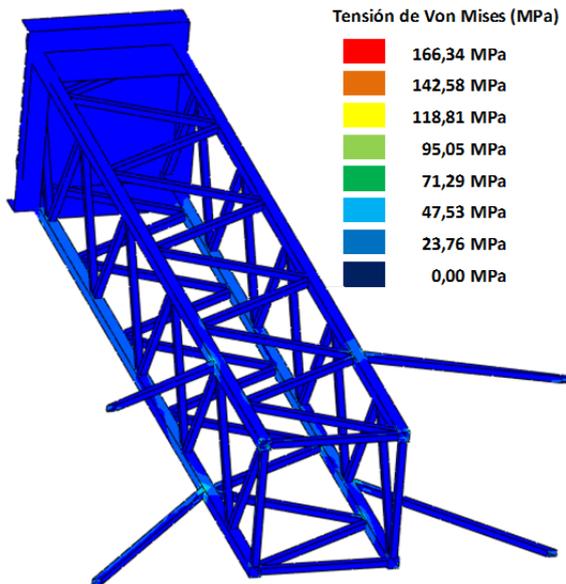


Figura 12: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Remontador horizontal con avance lineal" del modelo optimizado

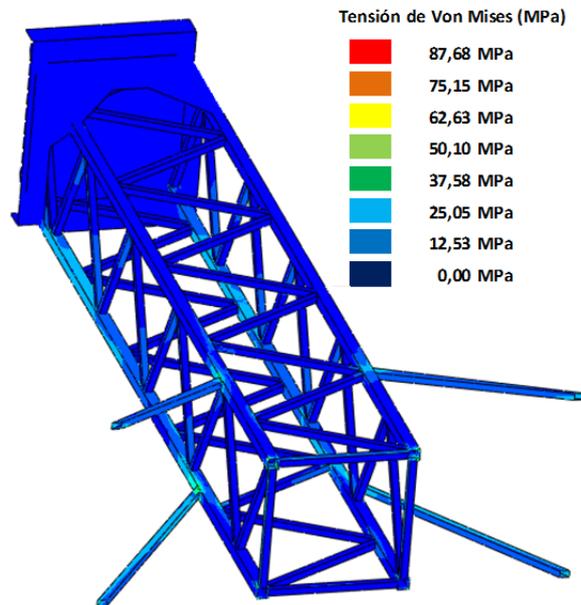


Figura 13: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Remontador horizontal con giro a la derecha" del modelo inicial

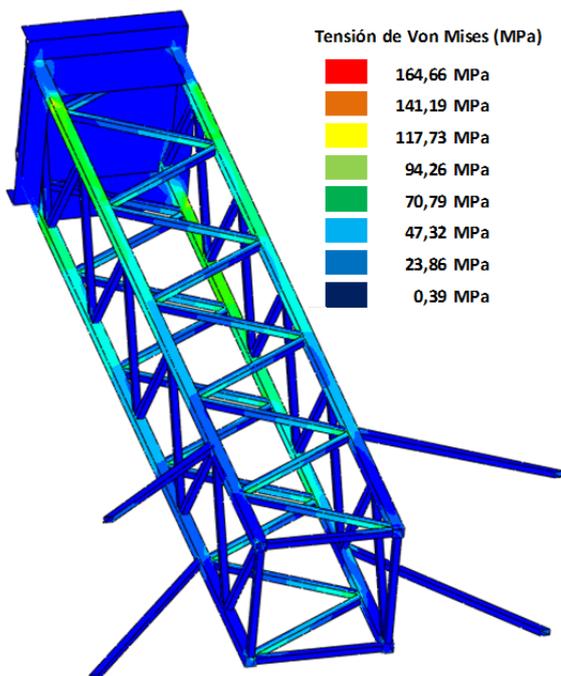


Figura 14: Tensiones de Von Mises del caso de carga "Remontador horizontal con giro a la derecha" del modelo optimizado

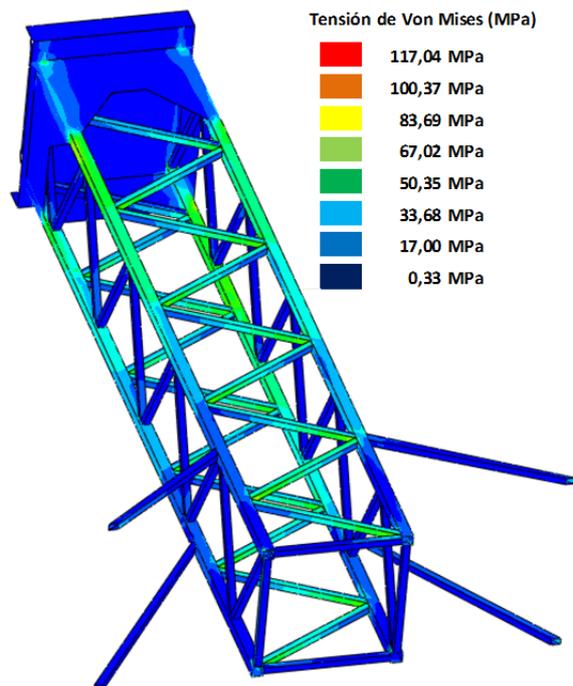


Figura 15: Tensiones de Von Mises del caso de carga “Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda” del modelo inicial

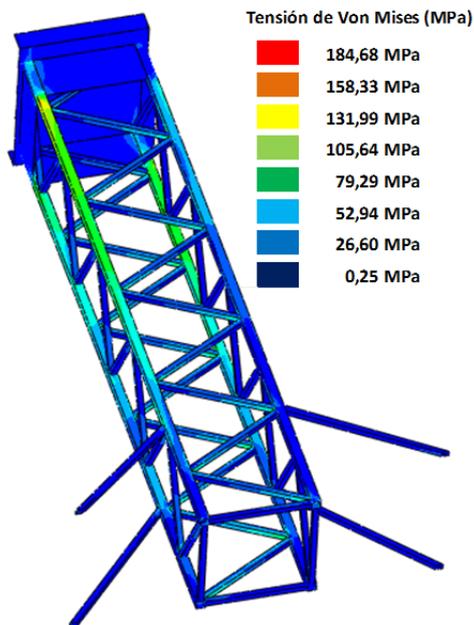
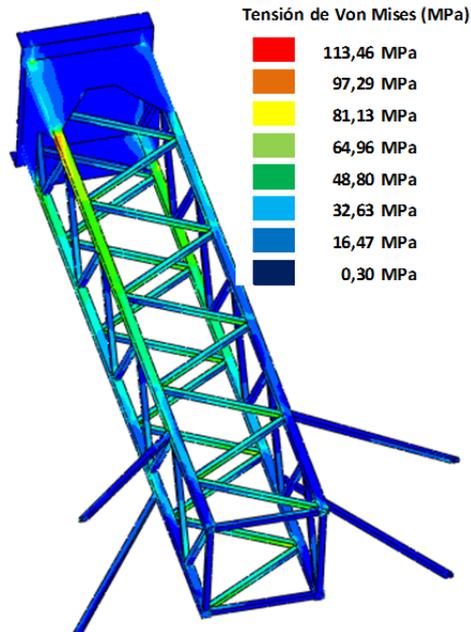


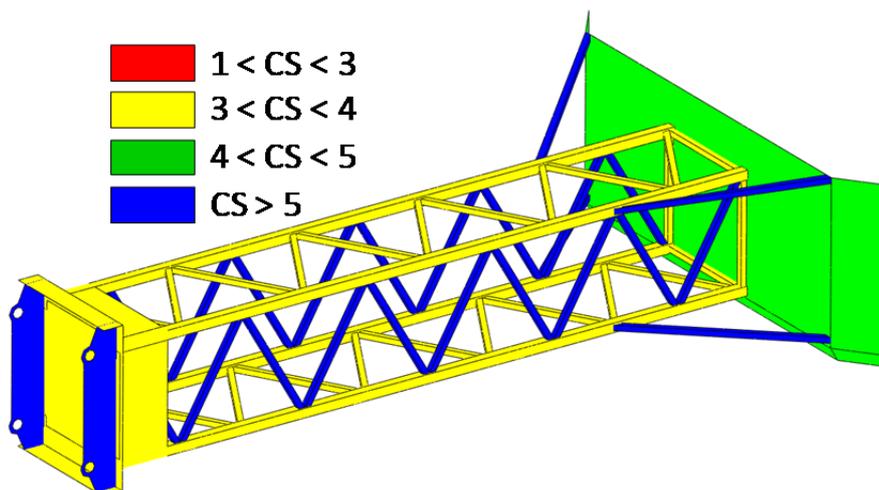
Figura 16: Tensiones de Von Mises del caso de carga “Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda” del modelo optimizado



Como se aprecia en las imágenes las variaciones geométricas y los cambios de espesor han aportado una reducción considerable de las tensiones máximas generadas en el modelo optimizado respecto al modelo inicial.

Análogamente al modelo inicial, la figura 17 representa los coeficientes de seguridad mínimos en cada uno de los componentes del chasis optimizado. En ella se observa la mejora obtenida en el diseño del remontador, al no aparecer elementos con coeficientes de seguridad inferiores a 3, al mismo tiempo que se optimiza el material empleado, obteniéndose coeficientes de seguridad entre 3 y 4 para la mayoría de los componentes.

Figura 17: Coeficientes de seguridad mínimos de los componentes del remontador optimizado



5. Conclusiones

En el estudio realizado se ha analizado y optimizado un modelo de remontador de cereal.

En el proceso de análisis y optimización se han empleado técnicas numéricas basadas en el Método de los Elementos Finitos. Mediante la aplicación de estas técnicas ha sido posible obtener resultados de tensiones equivalentes de Von Mises y desplazamientos, los cuales han permitido optimizar la estructura resistente del remontador según criterios de rigidez y resistencia.

En este proceso han sido analizados seis casos de carga, los cuales corresponden a las maniobras más frecuentes de este tipo de apero agrícola. Concretamente, los casos analizados han sido "Remontador horizontal con avance lineal", "Remontador horizontal con giro a la derecha", "Remontador horizontal con giro a la izquierda", "Remontador inclinado 30° con avance lineal", "Remontador inclinado 30° con giro a la derecha" y "Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda". El análisis realizado ha permitido concluir que el caso de carga crítico para la estructura resistente del remontador desarrollado es el caso "Remontador inclinado 30° con giro a la izquierda".

En el proceso de optimización del remontador han sido empleados perfiles comerciales, aplicando al diseño la máxima homogeneidad posible en los perfiles empleados con el fin de facilitar y abaratar el proceso de fabricación.

El diseño optimizado de remontador no presenta problemas según los criterios de rigidez y resistencia, y además reduce en un 3,80% su masa con respecto al modelo inicial.

Referencias

- Beermann, H.J. (1984) Static Analysis of Commercial Vehicle Frames –A Hybrid Finite-Elements and Analytical Method. *International Journal of Vehicle Design* 5(1–2) pp 26–52.
- Cappello, F. Ingrassia, T. Mancuso, A. et al. (2005) Methodical Redesign of a Semitrailer. *9th International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering. Computer Aided Optimum Design in Engineering IX Book Series: Wit Transactions on the Built Environment*, Volume 80, pp. 359–369.
- Carrera, M. Castejon, L. Miralbes, R. et al. (2010) Behaviour IA Rear Underrun Protection System on Car-to-Tank Vehicle Impact Used for Fuel Transportation, "*International Journal of Heavy Vehicles Systems*" 17(3–4). pp. 199–215.
- Deng, Y.D. Wang, J. Wen, Y. et al. (2011). The Static and Dynamic Characteristics Study of Aluminum Tank Semitrailer. *2nd International Conference on Manufacturing Science and Engineering. Manufacturing Process Technology*, PTS 1–5 Book Series: Advanced Materials Research, Volume 189–193, pp. 2233–2237.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1991). *La ingeniería agrícola en el desarrollo: la selección de insumos de mecanización*. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO N° 84.
- Hoefinghoff, J. Jungk, A. Knop, W. et al. (2011). Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 59(2), pp.689–691.
- Karaoglu, C. & Kuralay, N.S. (2002). Stress Analysis of a Truck Chassis with Riveted Joints. *Finite Elements in Analysis and Design* 38(12), pp1115–1130.
- Kodiyalam, S. & Sobieszczanski-Sobieski, J. (2001). Multidisciplinary Design Optimization - Some Formal Methods, Framework Requirements, and Application to Vehicle Design. *International Journal of Vehicles Design* 25(1–2), pp. 3–22.

- Li, M.H. Lam, F. & Lee, G. (2007). Structural Assessment of Van Trailer Floor Systems with Aluminium Frame and Wood Decking. *International Journal of Heavy Vehicles Systems* 14(2). pp 216–226.
- Malon, H. Garcia-Ramos, F.J. Vidal, M. & Bone, A. (2014) Design and optimization of a chassis for an Air-assisted Sprayer with two fans using the Finite Element Method. *Project Management and engineering research*. DOI: 10.1007/978-3-319-26459-2_8
- Miralbes, R. & Castejon, L. (2010). Fatigue Design of Tanker Semi-Trailers, *Dyna* 85(6). pp. 480–488.
- Miralbes, R. Malon, H & Castejon L. (2011) Diseño de accesorios para el acoplamiento en carretillas manipuladoras: plumines y portapalets. En: *Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering*. ISBN 978-84-615-4542-1
- Sicilia, V.J. (2015) Análisis estructural de un remontador de cereales para almacenamiento de maíz. Trabajo fin de Grado. Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. Universidad de Zaragoza
- Vidal, M. Bone, A. Garcia-Ramos, F.J. Malon, H & Villacampa, R.(2011) Desarrollo de máquina para la aplicación localizada de cebo rodenticidas en parcelas agrícolas. En: *Libro de resúmenes del XV International Congress on Project Engineering*. ISBN 978-84-615-4542-1