

ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE USO DE LOS ACEROS MICROALEADOS EN SEMIRREMOLQUES DE ALTA CAPACIDAD DE CARGA

ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF USE OF MICROALEATED STEELS IN HIGH CAPACITY SEMI TRAILER

Carlos E. Tais^a, Marcelo A. Costamagna^a, Marcos Marino^b

^a*Grupo de Estudios de Calidad en Mecatrónica, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María. Av. Universidad 450, 5900 Villa María, Córdoba Argentina, carlos.e.tais@gmail.com, <http://www.frvn.utn.edu.ar>*

^b*Departamento de Mecánica. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María. Av. Universidad 450, 5900 Villa María, Córdoba Argentina, metalurgia@frvm.utn.edu.ar, mmarino@frvm.utn.edu.ar <http://www.frvn.utn.edu.ar>*

Palabras clave: transporte, semirremolque, aceros microaleados, capacidad de carga

Resumen. En el transporte automotor de cargas por carreteras en Argentina, la capacidad neta a transportar se encuentra limitada por la legislación vigente que establece los pesos brutos máximos para cada configuración de ejes que poseen el camión tractor y semirremolque. Utilizando vehículos con un menor peso propio se logra un transporte más eficiente. Se propone el uso de materiales microaleados de alta resistencia para la construcción de semirremolques; este tipo de materiales ofrecen un alto valor en la resistencia de fluencia respecto a la de los aceros convencionales, lo cual resulta en la posibilidad de disminuir secciones y así el peso propio de la unidad. En este trabajo se realiza un análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de un semirremolque utilizando aceros avanzados de alta resistencia, y sometido a las condiciones de carga que permite la normativa actual, mediante la técnica del Método de Elementos Finitos con el objetivo de obtener una estimación de la reducción del peso propio, respecto de la construcción del mismo equipo con aceros comerciales para las mismas condiciones de seguridad estructural.

Keywords: transport, semi trailer, microalloyed steels, capacity to be transported

Abstract. In the automotive transport of loads by roads in the Argentina, the net capacity to be transported is limited by the current legislation that establishes the maximum gross weights for axle configuration that the tractor and semi-trailer have. Using vehicles with a lower own weight achieves a more efficient transport. The use of high-strength microalloyed materials for the construction of semi-trailers is proposed; this material have a high value in yield resistance with respect to that of conventional steels which results in the possibility of reducing sections and thus the unit's own weight. In this work an analysis of stresses and deformations in the structure of a semi-trailer using microalloyed steels and subjected to the loading conditions indicated by current regulations by means of the Finite Element Method technique is performed with the aim of obtaining an estimate of the reduction of the own weight, with respect to the construction of the same equipment with commercial steels for the same structural safety conditions.

1 INTRODUCCIÓN

La importancia que ha tomado el transporte de cargas por carreteras requirió grandes esfuerzos a las industrias del sector a fin de lograr equipos cada más eficientes, seguros y livianos con el propósito de transportar la mayor cantidad de carga útil en cada viaje, y en los casos en que deban circular sin carga debido a las cuestiones de logística, se busca una reducción importante en el consumo de neumáticos y combustible. Es por ello que los fabricantes están incorporando Aceros Avanzados de Alta Resistencia (AHSS) en la construcción de sus unidades ([Bouaziz, 2013](#); [Matlock, 2012](#); [Kwon, 2010](#); [Kuziak, 2008](#)).

La característica principal de este tipo de materiales es la de ofrecer un alto valor en la resistencia a la fluencia con límites elásticos superiores a los 550 MPa y tensiones de rotura superiores a los 700 MPa ([Frommeyer, 2006](#); [Yan, 2003](#)), valores muy superiores a los que tienen los aceros convencionales, lo cual resulta en la posibilidad de disminuir las secciones resistentes y por ende el peso propio de la unidad. Otra de las ventajas radica en la disminución del esfuerzo y en la complejidad de la manipulación de las partes que deben ensamblarse en cada uno de los conjuntos y subconjuntos durante el proceso de fabricación. Este aspecto es importante ya que, si bien existen empresas con un alto grado de automatización en sus procesos, también existe una gran cantidad en las que las tareas se realizan de modo manual o semi manual.

Es relevante mencionar que los cambios en las condiciones del proceso de producción que deben realizarse al incorporar estos materiales son mínimos debido a las buenas características de soldabilidad y conformación que estos aceros poseen, lo cual prácticamente no requiere la incorporación de tecnología adicional a la existente para la fabricación con materiales convencionales.

A lo expresado anteriormente deben sumarse las nuevas configuraciones de tracto camión y semirremolque que fueron habilitadas a partir del año 2018 por el Ministerio de Transporte de la Nación según el decreto 32/18 ([Ministerio de Transporte, 2018](#)) que modifica el Decreto 779/1995 de la Ley Nacional de Tránsito 24449, las que lograrán una importante reducción en el costo de cada tonelada transportada por carreteras de la República Argentina a partir del incremento del máximo peso bruto total autorizado.

La máxima carga neta o útil que se puede transportar dependerá de la configuración del equipo, cantidad de ejes y del peso propio del conjunto tractor semirremolque. Por lo tanto, utilizando unidades con un menor peso propio (tara) se logra un transporte más eficiente.

Es en ese contexto en el cual se propone el uso de aceros microaleados AHSS para el diseño de un semirremolque de tres ejes duales separados, configuración denominada 1+1+1 y tracto camión con un eje delantero simple y dos ejes traseros duales, configuración identificada como N° 25, caracterizada como S1, D2, D1, D1, D1 en el decreto 32/18, donde S1 (un eje simple), D2 (dos ejes con rodados dobles) y D1 (un eje con rodados dobles).

La máxima capacidad de carga total de esta configuración es de 55,5 toneladas, correspondiendo 6 toneladas en el eje delantero y 18 toneladas en los ejes duales del tándem trasero del camión y 10,5 toneladas en cada uno de los tres ejes duales del semirremolque.

El objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad de utilizar aceros AHSS y determinar el ahorro en peso propio respecto del empleo del acero F36 para las mismas condiciones de servicio y seguridad. A tal efecto se simulan dos modelos con las mismas dimensiones y condiciones de servicio utilizando los dos materiales citados modificando las secciones y espesores de manera de lograr las mismas condiciones de seguridad estructural. De esta manera se obtiene el volumen de material correspondiente a cada caso y es posible comparar el ahorro en términos de peso propio.

2 METODOLOGÍA.

El empleo de los aceros AHSS en la fabricación de equipos de transporte de carga ha sido estudiado anteriormente por los autores en [Marino \(2011\)](#) donde se analizó el comportamiento de este material para semirremolques con una configuración de tres ejes, dos en tándem más uno autodireccional (1+2), demostrando el ahorro que se produce mediante el uso de este material.

El equipo estudiado en este trabajo difiere del citado anteriormente en la separación de los tándems de ejes y por ende en la carga total máxima permitida. Se compara el comportamiento del acero microaleado AHSS respecto del acero de calidad comercial F-36 para la configuración denominada 1+1+1 explicada anteriormente adoptando en este caso el material denominado DOMEX 700. Se propone el estudio sobre un modelo simplificado de semirremolque de 15.5 m de largo de tres ejes traseros, separados cada uno 2.4 m, siendo el primero de ellos auto direccional y un perno rey ubicado en la zona delantera del remolque que permite su vínculo con el camión tractor, el cual se muestra en la Figura 1 para una capacidad de carga bruta de 55.5 tn que incluyen la carga de servicio, peso propio de la estructura y el peso del resto de los elementos constituyentes del equipo (ejes, suspensión, etc).

En este modelo se incluyen los elementos estructurales de relevancia como las vigas principales, travesaños y faldones laterales, delanteros y traseros.

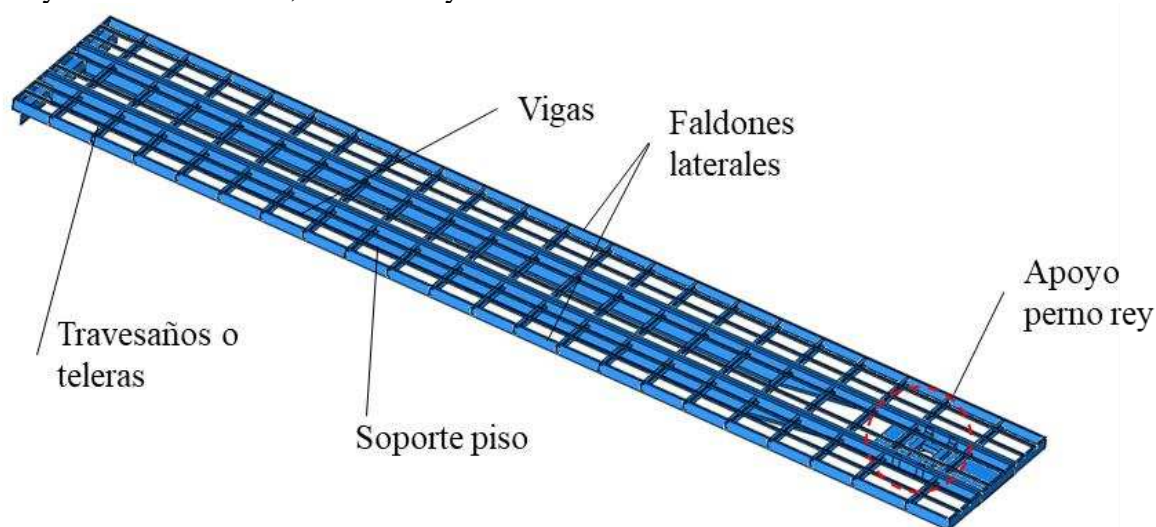


Figura 1: Estructura completa del semirremolque en estudio.

En el caso de las vigas principales se proponen espesores de 10 mm para las alas y de 5 mm para el alma en el caso del acero AHSS mientras que para el acero F36 los espesores son de 19 mm y 6 mm para las alas y para el alma respectivamente. Para los travesaños el espesor de chapa es de 4 mm para AHSS y de 6 mm para F36. Los mismos espesores se utilizaron para los faldones laterales, trasero y delantero.

Asimismo, a los fines de representar con la mayor aproximación posible el apoyo del equipo con la unidad de tracción, se incluyó el subconjunto estructural que soporta el perno rey, comprendido por los soportes del chapón de apoyo y este último (Figura 2). El estudio de este subconjunto es de particular importancia dada su condición de criticidad en la integridad estructural y de seguridad del equipo.

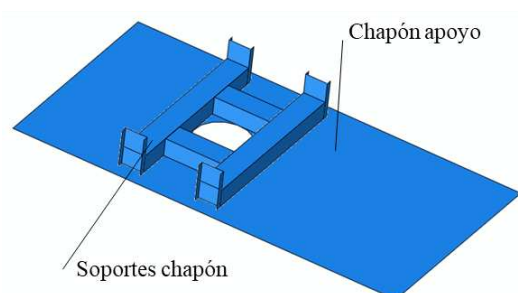


Figura 2: Subconjunto de apoyo del perno rey.

La transferencia de la carga transportada a la estructura resistente se efectuó considerando los elementos soportes del piso, que son quienes transfieren la carga aplicada sobre el piso al resto de la estructura, junto con las vigas principales y la superficie superior de los faldones laterales.

En este estudio se plantea el predimensionamiento de la estructura considerando que el coeficiente de seguridad resultante en el caso de acero AHSS debe ser el mismo que para el acero F36 teniendo en cuenta los diferentes valores de límites de fluencia de cada material. Para las hipótesis de carga planteadas, el coeficiente de seguridad adoptado es $CS = 1.75$ (Faires, 1994). Bajo estas condiciones de trabajo se puede estimar la magnitud de reducción de volumen y su consecuente disminución en el peso propio de la estructura.

2.1 Modelo matemático

Para el estudio propuesto anteriormente se plantea un análisis estático lineal en donde se incluyen coeficientes de mayoración de carga (ASSHTO, 1993). La ecuación que describe el campo de desplazamientos u_i ($i = 1..3$) de un material isotrópico y homogéneo, sometido a fuerzas aplicadas en su superficie y despreciando fuerzas de volumen es (Boresi et al., 1993):

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} = 0 \quad i, k = 1..3 \quad (1)$$

En (1) los parámetros λ y ν son las constantes de Lamé para un material que caracterizan la relación entre el tensor de tensiones σ_{ij} ($i, j = 1..3$) y el tensor de deformaciones ϵ_{ij} ($i, j = 1..3$).

La ecuación (2) es lineal y permite obtener el campo de desplazamientos u_i ($i = 1..3$) del cuerpo. La definición del tensor de deformaciones en términos de desplazamientos es:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad i, j = 1..3 \quad (2)$$

De la relación constitutiva de cada material, el tensor de tensiones se calcula mediante:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda e\delta_{ij} \quad i, j = 1..3 \quad (3)$$

Donde $e = \epsilon_{kk}$ ($k = 1..3$) es la traza del tensor de deformaciones,

Tanto el acero AHSS como el F36 presenta características de ductilidad por lo que para analizar el estado tensional se utiliza el criterio de la máxima energía de distorsión (Boresi et al., 1993).

Se muestran en la Tabla 1 (DOMEX, 2000; IRAM, 1998), los valores máximos admisibles de esfuerzo que serán comparadas con los resultados de la simulación para determinar el coeficiente de seguridad de acuerdo a:

$$CS = \frac{\sigma_{fl}}{\sigma_{eq}} \quad (4)$$

donde σ_{fl} es el esfuerzo de fluencia del material y σ_{eq} es el esfuerzo equivalente calculado a partir de la teoría de la máxima energía de distorsión:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5)$$

donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son las tensiones principales.

Material	Densidad [kg/m ³]	Módulo elasticidad [MPa]	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia [MPa]	Tensión de rotura [MPa]
IRAM F-36	7800	200.10 ³	0.3	360	560
AHSS DOMEX 700	7800	200.10 ³	0.3	700	900

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales.

La carga aplicada considera sobrecargas debido a los efectos dinámicos, errores en la distribución de las mismas y situaciones de impacto debido al deterioro de las carreteras, estas se estiman en un 30% del valor de la carga neta a transportar (ASSHTO, 1993).

Los vínculos aplicados a la estructura corresponden a los apoyos sobre las vigas del conjunto de los ejes y elásticos. En la Figura 3 se muestra la aplicación de las condiciones de borde al modelo.

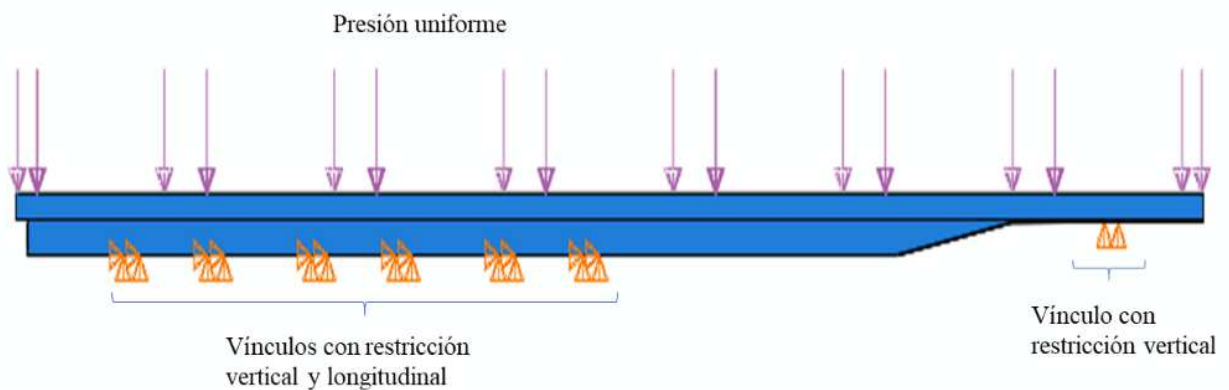


Figura 3: Condiciones de vínculo y cargas aplicadas a la estructura.

Las simulaciones se realizan utilizando software de cálculo comercial basado en el Método de Elementos Finitos ABAQUS v6.7, (DASSAULT SYSTEMS, 2019). Los diferentes elementos estructurales han sido modelados utilizando elementos tipo placa con seis grados de libertad por nodo. Las uniones soldadas han sido incorporadas mediante condiciones de contacto tipo "tie". La modificación de las propiedades mecánicas de los materiales ha sido considerada en el valor del esfuerzo de fluencia adoptado. La malla generada se corresponde con la geometría a discretizar utilizando elementos cuadriláteros (S4R) para regiones regulares y elementos triangulares (S3R) o mixtos en los casos en que se presente irregularidad. El modelo posee 225082 elementos y 237267 nodos. Con esta discretización se considera que los resultados obtenidos poseen una precisión adecuada.

3 RESULTADOS

El análisis de resultados se basará sobre dos variables críticas a tener en cuenta en el diseño de la estructura resistente del semirremolque: el esfuerzo de trabajo calculada mediante (5) y la deflexión vertical máxima que adquieren las vigas principales que de superar un valor máximo resultará en el no cumplimiento de las condiciones de servicio para las que fue diseñado el equipo. Para esta variable se adopta un valor máximo correspondiente a una fracción de la máxima distancia entre apoyos l . Se adopta $l/1000$ de acuerdo a [Faires \(1994\)](#). **Material AHSS**

Las Figuras 4 a 7 muestran los resultados de la simulación efectuada sobre la estructura para el caso en que la misma sea fabricada utilizando material AHSS. Asumiendo que el coeficiente de seguridad debe ser igual a 1.75, puede establecerse el esfuerzo admisible para el material AHSS en $\sigma_{adm} = 400$ MPa.

En la Figura 4 puede observarse la uniformidad predominante en la distribución del esfuerzo, en particular en los elementos estructurales que corresponden a los faldones y soportes de piso, los cuales no revelan ningún grado de compromiso en el valor de los esfuerzos alcanzados.

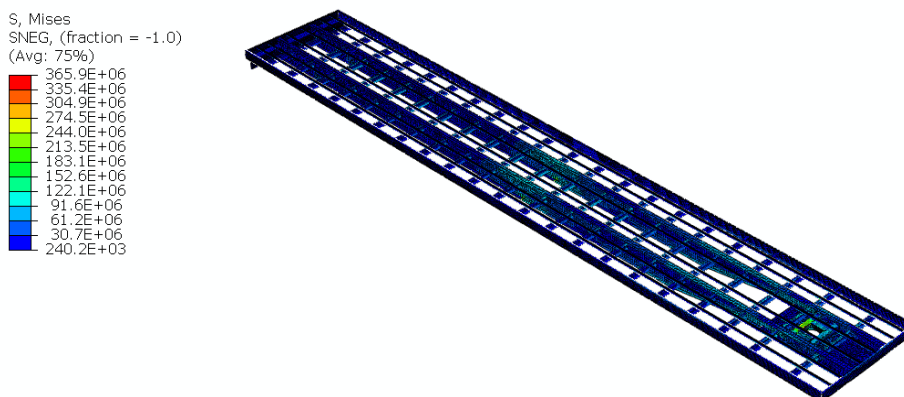


Figura 4: Esfuerzo equivalente de Von Mises sobre la estructura completa del semirremolque. Material AHSS

Los valores máximos se alcanzan en el subconjunto de apoyo del perno rey, para el cual la distribución del esfuerzo se muestra en detalle en la Figura 5. El valor máximo que se alcanza es de 365 MPa lo cual indica que no supera la fluencia del material

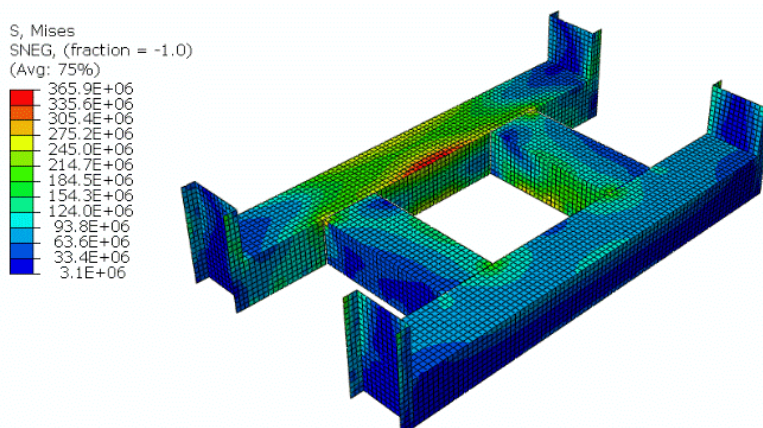


Figura 5: Esfuerzo equivalente de Von Mises en el subconjunto de apoyo del perno rey. Material AHSS

Dado que las vigas principales resultan los elementos estructurales de mayor interés, la distribución del esfuerzo en la misma se muestra en la Figura 6. El máximo valor alcanzado se encuentra por debajo del valor admisible de 350 MPa.

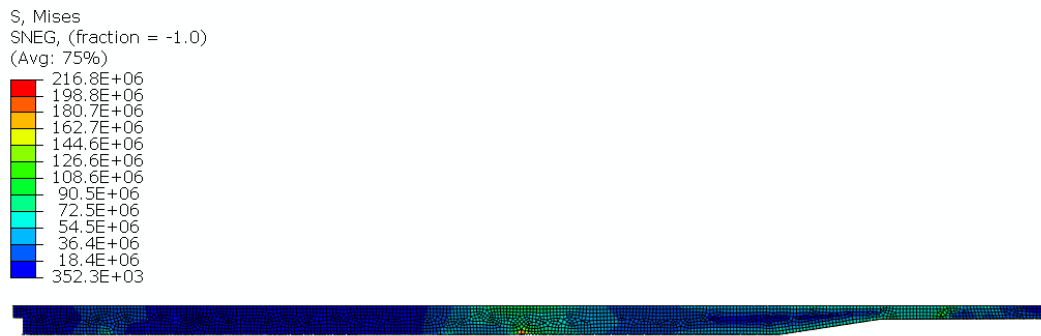


Figura 6: Esfuerzo equivalente de Von Mises en las vigas del semirremolque. Material AHSS

Como se dijo anteriormente, las deformaciones máximas también representan una restricción en el diseño de estos equipos. La distribución de la deflexión vertical se muestra en la Figura 7. En este caso, los valores máximos alcanzan los 10 mm, lo cual en la longitud correspondiente a la distancia entre apoyos (6790 mm) supera al valor máximo de 6.79 mm.

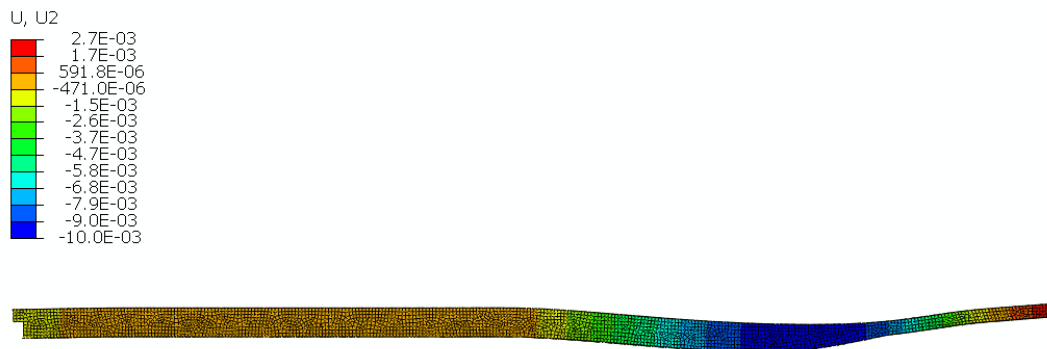


Figura 7: Deflexión vertical de la viga principal. Material AHSS

Para compensar esta situación es factible dotar a la viga y por ende a la estructura completa de una contra flecha igual o superior a la máxima deformación obtenida, compensación que se realiza habitualmente en este tipo de productos.

3.2 Material F-36

Los resultados obtenidos cuando en la estructura del semirremolque se utiliza un material de calidad comercial F-36 se muestran en las Figuras 8, 9 10 y 11. En este caso se modificaron los espesores de chapa sin variar las dimensiones principales de los elementos estructurales.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de seguridad debe mantenerse igual a 2, el esfuerzo admisible para el material F360 es $\sigma_{adm} = 205$ MPa. Con respecto a las deformaciones se mantiene el valor admisible en 6.79 mm

En la Figura 8 se muestra la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises para la estructura completa resultando similar al caso del material microaleado. Se observa que los valores

máximos alcanzan los 186 MPa, correspondiendo la región más comprometida al subconjunto de apoyo del perno rey. Esta región más comprometida se muestra en detalle en la Figura 9.

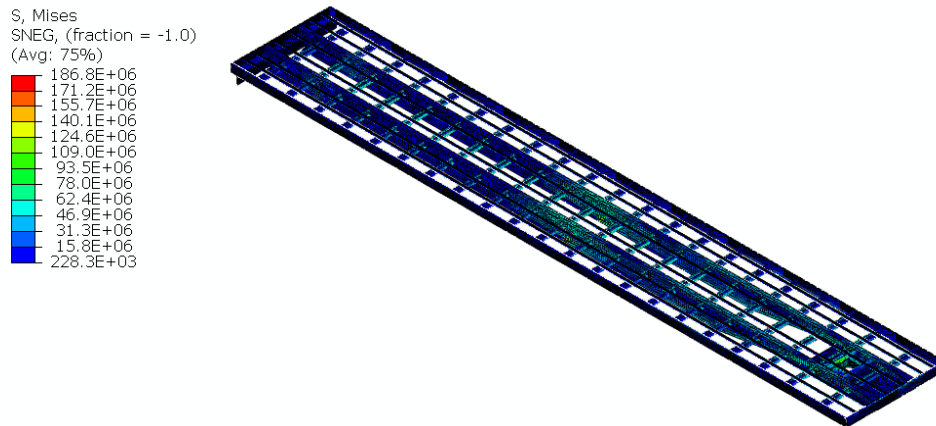


Figura 8: Esfuerzo equivalente de Von Mises sobre la estructura completa del semirremolque. Material F36

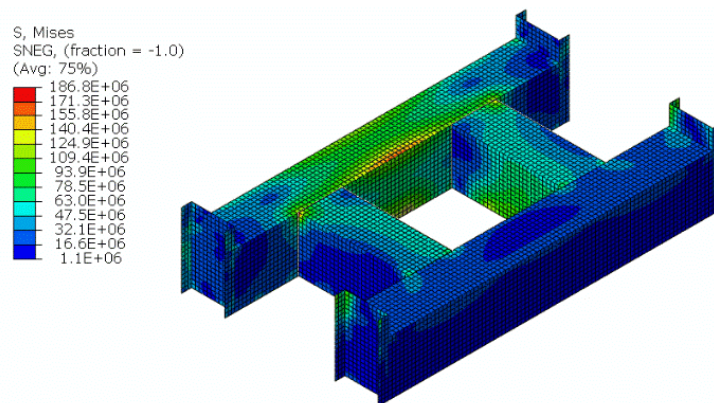


Figura 9: Esfuerzo equivalente de Von Mises en el subconjunto de apoyo del perno rey. Material F36.

En la Figura 10 se muestra en detalle la distribución del esfuerzo equivalente de Von Mises en las vigas principales. Al igual que en el caso anterior tampoco se alcanzan valores que puedan comprometer la fluencia del material

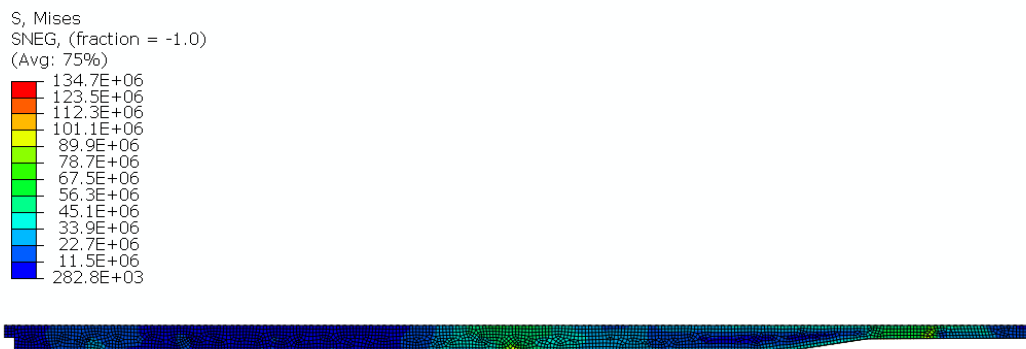


Figura 10: Esfuerzo equivalente de Von Mises en las vigas del semirremolque. Material F36.

En la Figura 11 se muestra la deflexión máxima para el diseño utilizando material F36. En este caso, las deformaciones no superan el máximo admisible de 6.79 mm. Si bien en este caso no requeriría dotar a la estructura de una contraflecha, es común hacerlo para lograr que la estructura resistente una vez cargada se encuentre con deflexión vertical nula.

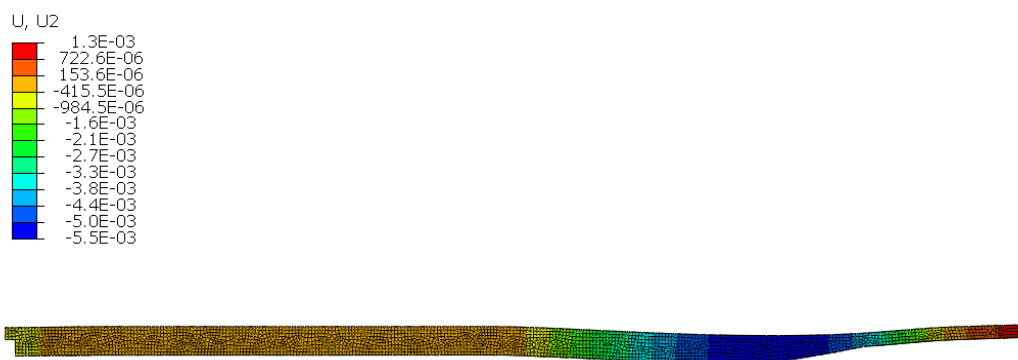


Figura 11: Deflexión vertical de la viga principal. Material F36.

4 CONCLUSIONES

Mediante el análisis efectuado en el presente trabajo se concluye que ambas estructuras cumplen satisfactoriamente con las condiciones requeridas de tensión de trabajo y la deflexión vertical máxima cuando son sometidas al estado de carga considerado. Si bien los esfuerzos cuando se utiliza un acero AHSS son considerablemente inferiores a el esfuerzo de fluencia de material, las deformaciones son superiores a las que se obtienen con la construcción del equipo con material F-36 situación que se compensa con la deformación previa de la estructura (contraflecha), procedimiento usual en la fabricación de este tipo de estructuras. Esto demuestra que es factible el uso de este tipo de materiales en la fabricación de semirremolques.

La estructura fabricada con acero AHSS posee un peso propio de 1.955 kg, mientras que la construida en acero comercial F-36, tiene un peso de 2.806 kg. Se puede concluir que si bien ambas estructuras cumplen satisfactoriamente las condiciones de carga impuestas, se logran reducciones superiores al 30% en el peso propio de la unidad cuando se usan aceros de alta resistencia. Esto se traduce de manera directa en un incremento de la carga útil a transportar con lo cual se logra una importante reducción del costo de tonelada transportada.

REFERENCIAS

- ASSHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 1993
- Boresi A.P., and Schmidt R.J., *Advanced Mechanics of Materials*. John Wiley and Sons, 5 Edición, 1993.
- Bouaziz, O., Zurob, H., and Huang, M., Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications. *Steel research international*, 84(10), 937-947. 2013
- Dassault Systems. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/>, 2010.
- DOMEX. Catálogo DOMEX 700MC. Informe Técnico, Society American Engineering, 2000.
- Faires, V. M., *Diseño de Elementos de Máquinas* (4ta Edición), Montaner y Simon 1994
- Frommeyer, G., and Brück, U., Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Fe-Mn-Al-C Light-Weight TRIPLEX Steels. *Steel Research International*, 77(9-10), 627-633. 2006

- IRAM. Norma IRAM-IAS, 3 edición, 1998.
- Kuziak, R., Kawalla, R. and Waengler, S., Advanced high strength steels for automotive industry. *Archives of civil and mechanical engineering*, 8(2), 103-117. 2008
- Kwon, O., Lee, K. Y., Kim, G. S. and Chin, K. G., New trends in advanced high strength steel developments for automotive application. *Materials Science Forum*, 638, pp. 136-141. 2010.
- Marino, M., Costamagna, M. and Tais, C. Estudio de aceros microaleados de alta resistencia para su empleo en semirremolques, *Mecánica Computacional*, XXX, págs. 91-97. 2011
- Ministerio de Transporte, Ley Nacional de Tránsito 24449. 1994.
- Matlock, D. K., Speer, J. G., De Moor, E. and Gibbs, P. J., Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview. *Jestech*, 15(1), 1-12. 2012
- Onink, M., Zijp, J. and Bodin, A.. High-strength steels for automotive applications. *41st Mechanical Working and Steel Processing Conference* (pp. 61-66). 1999
- Yan, B., & Xu, K., High strain rate behavior of advanced high strength steels for automotive applications. *Iron and Steelmaker*, 30(6), 33-42. 2003
- Zienkiewicz O. and Taylor R. *The finite element method*, volumen I. McGraw Hill, 1994.