

OPTIMIZACIÓN DE AREA EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS CURVAS LIGERAS PARA UN SOPORTE DE TELEVISIÓN DE BRAZO ARTICULADO

Data de aceite: 01/04/2024

José Heriberto Simental Vázquez

Tecnológico Nacional de México campus
Tecnológico de Ciudad Juárez
Departamento de Metal Mecánica

Ricardo Chavarría Estrada

Tecnológico Nacional de México campus
Tecnológico de Ciudad Juárez
Departamento de Metal Mecánica

RESUMEN: En esta investigación fue reducir la cantidad de material a través de un rediseño de estructuras aplicados en los brazos de soportes articulados para un televisor de un peso máximo de 60 kilos para satisfacer las mismas necesidades de un producto estándar se redujo un 20% menos de material para su elaboración, aun considerando materiales cuyas propiedades mecánicas tienen usos de baja exigencia; esto se logró por medio del programa Onscale. Al final se llegó a la conclusión de que entre más larga era la pieza que se quisiese reemplazar, este diseño ahorra un porcentaje mayor de material, por lo que puede ser aplicado para componentes más grandes, que los contemplados en este trabajo. La investigación destacó el considerar un grupo de diseños estructurales

utilizados principalmente en arquitectura conocidos como “estructuras ligeras”; siendo en México y en España el principal exponente el arquitecto Félix Candela” y su uso de las llamadas estructuras de doble curvatura o de cascarón. Tomando como principio el Teorema de Egregium de matemático Friedrich Gauss que demuestra que una superficie tiende a mantener su curvatura total cuando es deformada.

PALABRAS-CLAVE: Estructuras ligeras, Análisis de Von Mises, Estructuras de doble curvatura, Onscale y Teorema de Egregium.

INTRODUCCIÓN

La teoría al respecto de las estructuras laminares, también son conocidas como cáscaras, no es novedad, sino que junto con la teoría de placas son una de las ramas de estudio más antiguas de la mecánica de sólidos, y se han utilizado en la arquitectura por varios años, Altenbasch (2014). Se puede describir una estructura laminar como una superficie delgada y curva de pequeño espesor comparada con sus dos dimensiones restantes, Basett (2013). En años recientes, trabajos

de diseño como el de Mike Schlaich (2018) han demostrado que es posible optimizar estructuras como puentes, minimizando el peso, con elegancia y estabilidad mediante la aplicación de estructuras tridimensionales conocidas como: estructuras de doble curvatura o de cascarón. Estas permiten utilizar el material mínimamente necesario, para soportar diversas cargas lo que implica ahorros en material, sobre todo en estructuras fabricadas en acero. Este proyecto se enfoca en el rediseño de un soporte para televisor para reducir el uso de material capaz de soportar 110 libras de peso.

MATERIALES Y MÉTODO

Teoremas de estructuras

En esta sección se analizan y comparan las ideas presentadas respecto a ciertos puntos que se consideraron importantes para posteriormente seleccionar una la figura 1 a) se aprecia una propuesta inspirada en los domos geodésicos, estructuras basadas principalmente en triángulos, que reparten las cargas a lo largo de la estructura, es un diseño bastante similar al habitual para los soportes, pero trata de eliminar una buena parte del material utilizado, figura 1 b) está inspirada en los conceptos del trabajo de Mike Schlaich en los cuales se utiliza únicamente el material a través del cual hacen efecto las fuerzas internas de la pieza, de manera de que estas únicamente actúen a tracción o a compresión. Este diseño, teóricamente utiliza una línea central la cual tiene la forma de una ecuación cuadrática sacada de los cálculos que se utilizan para determinar las fuerzas cortantes y momentos flectores a lo largo de una viga en voladizo. Figura 1 c) Utiliza un diseño un poco más complejo basado en las formas de hiperboloide de revolución que posee el hipódromo de la zarzuela de Eduardo Torroja; en este se pueden apreciar un par de láminas paralelas y curvadas que no requieren de la parte central habitual de la pieza.

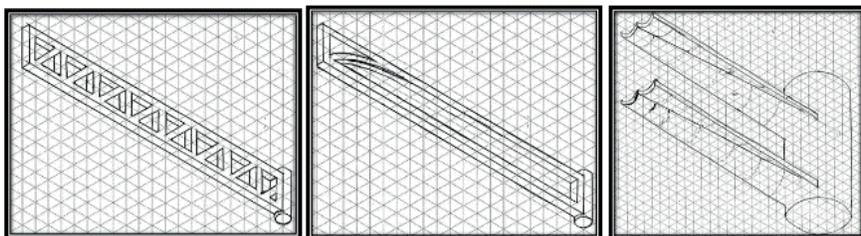


Figura 1 a) Triángulos de los domos geodésicos, b) Diseño de Mike Schlaich. c) Diseño Hipódromo de la Zarzuela.

Análisis de selección de teoremas de estructura

Analizan y compararan las ideas presentadas respecto a ciertos puntos que se consideraron importantes como se muestra en la tabla 1 que la del diseño cuadrático es el camino más adecuado a seguir por el ahorro de material, donde la diferencia es del 30 % comparada con el diseño de estructura triangular este se basa en utilizar la cantidad mínima, mientras que el otro solo consiste en quitar algunas partes de la pieza,

Propuesta	Estructura triangular	Diseño cuadrático	Hiperboloide
Ahorro de material (30%)	10	30	20
Facilidad de construcción (20%)	15	10	5
Resistencia a las cargas (30%)	25	25	20
Facilidad de ensamblaje (20%)	20	15	15
Total (100%)	70	80	60

Tabla 1 comparativa de las propiedades teóricas de cada teorema de estructuras.

Mejora a la estructura seleccionando

Una de las características de la estructura seleccionada y hacer una amalgama, se toma inspiración del teorema de Egregium de Friedrich Gauss. Hernández (2010) explica que este teorema, el cual comprueba matemáticamente que de la curvatura total de una superficie es invariable, a no ser que esta se estire o deforme, de manera simplificada esta es la razón por la cual una hoja de papel puede soportar un par de veces su propio peso al ser curvada como se muestra en la figura 2 a); al considerar láminas de metal como una superficie plana, y al forzar en ellas una superficie con curvatura positiva, la segunda curvatura debe ser cero para mantener su integridad, es por eso que surge una cuarta idea de diseño, representada en la figura 2b.

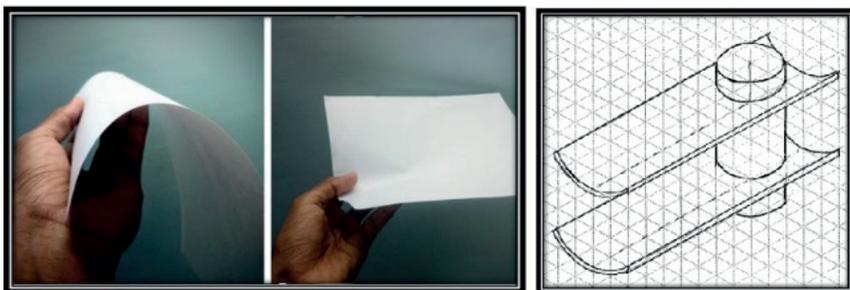


Figura 2 a) Ejemplificación del teorema de Egregium b) Inspirada en el teorema de Egregium.

Diseño seleccionado

En esta sección es el ensamble de las piezas que componen un soporte para tv de brazo articulado comercial donde las barras en voladizo convencional en su estructura figura 3 a). Las barras en voladizo convencionales que han sido substituidas por nuestra propuesta con curvatura y en lo extremos son base cilíndrica figura 3 b).

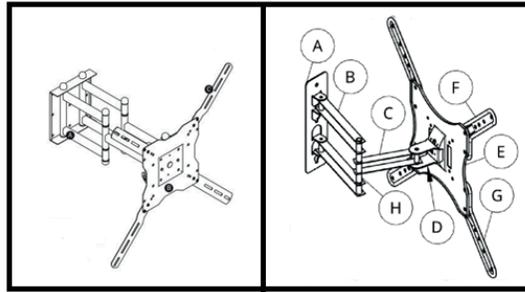


Figura 3 a) Ensamble comercial b) Ensamble con componentes diseñados

El componente B, son un par de barras paralelas e iguales, la superior y la inferior. Es una de las piezas críticas a rediseñar. En este punto cada una tiene de una sección transversal que consta de dos placas de metal con forma parabólica y un grosor de 1.5 mm, con las cuales se busca la capacidad de soportar mayor carga con menos material. La carga vertical en esta zona se reparte equitativamente para ambas barras, pero la carga horizontal que reciben debido al momento flector que reciben para mantener el equilibrio, hace que la barra superior reciba una carga de tracción, mientras que la inferior recibe una carga de compresión. Se espera que el cilindro metálico y hueco que une ambas barras parabólicas sea unido mediante soldadura y tiene la aparte de función estructural mostrada en la figura 4. El componente D, esta pieza también consta de una placa de metal, prensada y doblada con grosor de 2mm, es uno de los componentes que permiten que el televisor pueda se ajustado por medio de inclinación, ya que posee un par de muescas que se ensamblan con uno de los pares de protuberancias de la pieza E, las que le permiten un rango de inclinación de 40° figura 4.

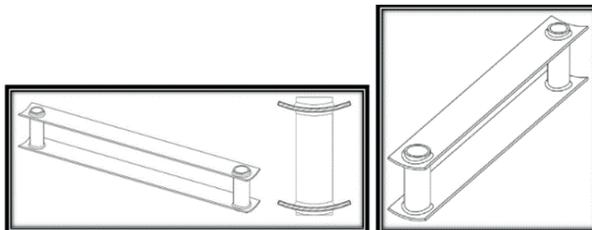


Figura 4 componente B y C

Selección de material

Simplificar el sistema de vigas en voladizo que se forma cuando se tiene una extensión total, que es cuando se produce la mayor cantidad de tensión. Entonces tenemos los siguientes datos visualizados con ayuda de la figura 5 a). Donde w es el peso máximo de una tv de 40 pulgadas multiplicado por 2, que es el factor de seguridad que se estableció y debemos convertir a newtons multiplicando por la aceleración debida a la gravedad 9.81m/s^2 . Para analizar la barra más externa utilizaremos el diagrama de cuerpo libre de la figura 5 b).

Se tiene como incógnitas la reacción en el punto A. Entonces procedemos a plantear ecuaciones para empezar a encontrar esos valores, tomando en cuenta que el soporte a plena extensión no se mueve, por lo tanto, la sumatoria de fuerzas para los ejes y momentos es igual a cero en la ecuación 1.

Ecuación 1: Sumatoria de fuerzas, vertical y horizontal. Barra Principal

$$\sum F_x = 0 = R_{ax} \quad (2)$$

$$\sum F_y = 0 = R_{ay} - W = R_{ay} - 588.6\text{N} \quad (2)$$

$$R_{ay} = 588.6\text{N} \quad (3)$$

Ecuación 2: Sumatoria de momentos (barra principal)

$$\sum M^{\curvearrowright} = 0 \quad M_A - W \cdot (0.13\text{m})$$

A

$$M_A = 588.6\text{N} \cdot 0.13\text{m} \approx 76.52\text{N} \cdot \text{m}$$

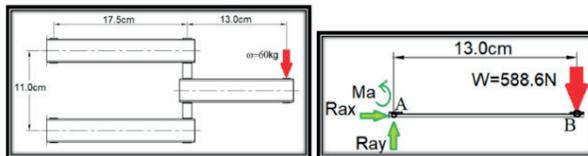


Figura 5 a) Carga estática b) Diagrama de cuerpo libre de barra externa.

Debido a que se puede considerar una viga con carga puntual en un extremo determinamos que el momento flector calculado es el momento máximo ejercido sobre esta pieza. Y para calcular el esfuerzo por flexión es necesario determinar el momento de inercia de la sección, la cual se puede ver en la figura 6. se trata de una viga rectangular de sección no llena, ya existe una ecuación para determinar su momento de inercia, por lo tanto:

Ecuación 3: Momento de inercia

$$I = \frac{bh^3 - b_0h^3}{12} = \frac{20mm \cdot (30mm)^3 - 17.5mm \cdot (27.5mm)^3}{12} \quad (1)$$

$$I = 14671.222mm^4 \quad (2)$$

Ecuación 4: Esfuerzo teórico (barra principal)

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{(76.52N \cdot m) \cdot (15mm)}{14671.222mm^4 \cdot \left(\frac{1m}{1000mm}\right)^3} \approx 7.823MPa \quad (1)$$

En figura 7 se determina que, al ser una estructura simétrica, las reacciones verticales se reparten equitativamente entre los puntos C y D. mientras que el torque en el punto A produce una fuerza horizontal en sentidos contrarios el cual se debe descomponer para obtener los diagramas de cuerpo libre.

Esa es la fuerza horizontal que soportaría si fuera una sola viga, por lo que la dividimos entre las dos. Por lo tanto, ahora tenemos los diagramas de cuerpo libre mostrados en la figura 7.

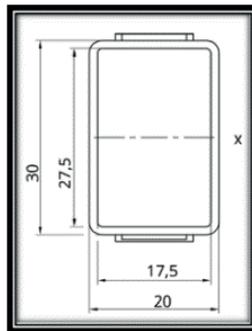


Figura 6 Sección de barra estándar A vista frontal para soporte de Tv.

Ecuación 6: Fuerza horizontal (barras secundarias)

$$F_H = \frac{76.52N - m}{\frac{11cm}{2} \cdot \left(\frac{1m}{100cm}\right)} = 1391.27N \quad (1)$$

$$F_H = \frac{1391.27N}{2} = 695.63N \quad (2)$$

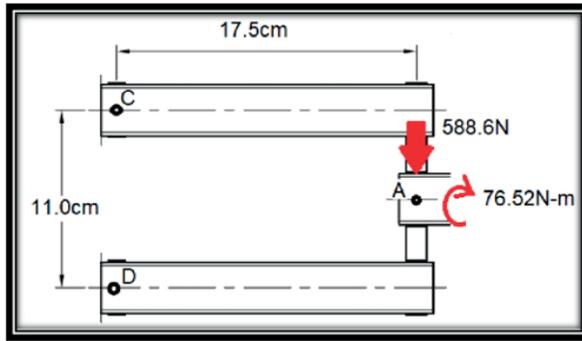


Figura 7 Datos para el segundo ejercicio de estática.

Calculamos el momento flector que será el mismo para los puntos C y D.

Ecuación 7: Momento flector (Barras secundarias)

$$\sum M_C = 0 = M_C - (294.3N) \cdot (0.175m)$$

$$M_C = 51.50N \cdot m$$

Con la información calculada hasta el momento se puede calcular el esfuerzo total con la ecuación de esfuerzos combinados con la fórmula:

Ecuación 8: Esfuerzo combinado (barras secundarias)

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{M \cdot c}{I} \quad (1)$$

Donde:

$$A = (20mm) \cdot (30mm) - (17.5mm)(27.5mm) = 118.75mm^2$$

$$P = 695.63N ; M = 51.50N \cdot m ; c = 15mm ; I = 14671.22mm^4$$

$$\therefore \sigma = \frac{695.63N}{(118.75mm^2) \cdot \frac{1m}{(1000mm)}^2} + \frac{51.50N \cdot m \cdot (15mm)}{(14671.22mm^4) \cdot \frac{1m}{(1000mm)}^3}$$

$$\therefore \sigma \approx 58.51.2MPa$$

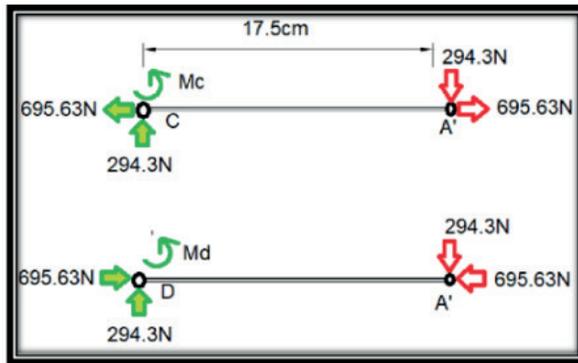


Figura 8 Diagrama de cuerpo libre de las barras paralelas.

Se ha preseleccionó el acero 1020 por la descripción de sus usos y propiedades, ya que como se puede ver en su hoja técnica en el anexo C; se le considera un acero de bajo contenido de carbono, de fácil mecanizado y buena soldabilidad; es de baja dureza para usos convencionales de baja exigencia, cuando se requiere una superficie muy dura pero un centro tenaz, este acero cementado cumple perfectamente. Se espera que su límite de fluencia al estar laminado en caliente, sea suficiente para soportar la concentración de esfuerzos que se pueda producir.

Validación del Diseño

Se pondrán a prueba las piezas que soportan la mayor cantidad de esfuerzos por medio de ingeniería asistida por computadora, en este caso se utilizó la plataforma online de Onscale para todos los estudios y pruebas, para luego analizar las zonas donde se concentran los esfuerzos y asegurarse de que el material resista, o en caso de ser necesario, que este sea cambiado por uno más resistente y adecuado. Tales componentes fueron expuestos a condiciones similares a las calculadas en la sección. La figura 9 muestra los resultados del análisis de Von Mises en vista isométrica, mientras que en la figura 10 se hace énfasis en las zonas donde los esfuerzos se concentran. Nótese en la figura 10, la concentración de esfuerzos en las zonas exteriores de las superficies curvas de la barra, además de en la unión que la misma tiene con el cilindro que le da estructura a la pieza.

Optimización

El primer aspecto a mejorar es redondear algunas uniones para distribuir mejor los esfuerzos que se acumularon en ellas; el segundo aspecto es el que se ve claramente en las figuras 9 y 10; aquí la tensión acumulada llega al rango de los Giga pascales, lo cual es muy por encima del límite de fluencia del material que preseleccionamos. Con estos resultados iniciales se puede determinar en cuales zonas debemos enfocarnos para modificar la geometría, y empezar a considerar un cambio en el diseño físico de Se realizaron varias

modificaciones hasta encontrar la geometría se aumentó la curvatura del perfil de las barras paralelas, y se agregó un soporte en la parte inferior de ambas para la concentración de esfuerzos, tales modificaciones se pueden observar en la vista de la figura 11. Se observan los resultados del análisis de esfuerzos de Von Mises para la pieza diseñada, en el cual se aprecia que la concentración de esfuerzos máxima es 420MPa. Figura 12.

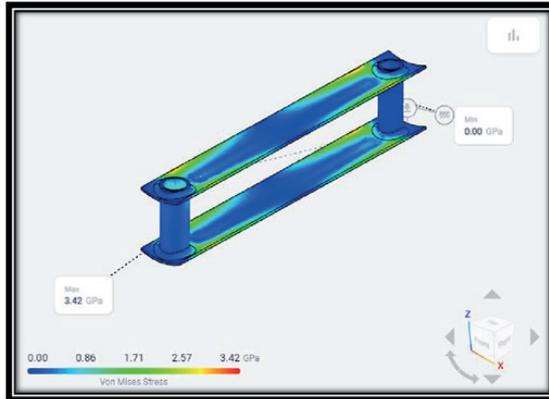


Figura 9 Análisis de Von Mises, primera versión, vista isométrica.

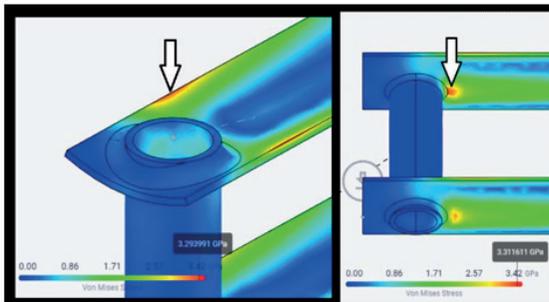


Figura 10 Concentración de esfuerzos, primera versión.

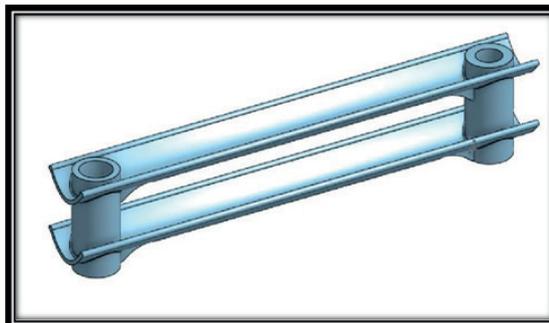


Figura 11 Vista de la geometría final del componente C.

Por su parte, en la figura 13, se muestra el análisis de esfuerzos para las barras secundarias, que aparte de soportar el peso de la tv, mantienen en equilibrio un torque para evitar que la estructura gire y caiga.

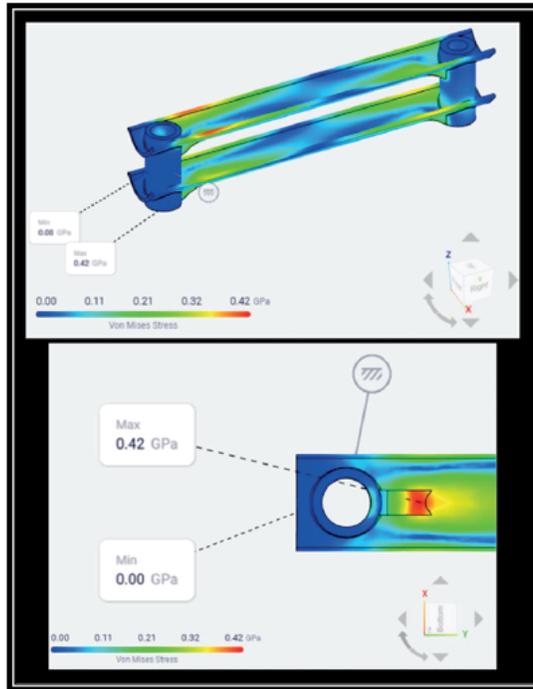


Figura 12 Análisis de esfuerzos de Von Mises, componente C. Final.

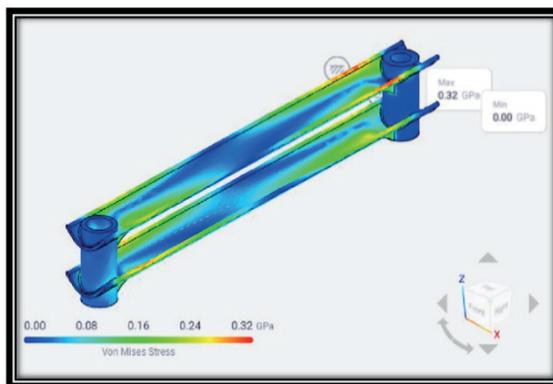


Figura 13 Análisis de esfuerzos componente B final.

RESULTADOS

Se realizó una réplica 3D de una barra convencional de un soporte de brazo articulado, en este caso debemos contemplar los tres elementos estructurales que se ponen en juego para estimar el ahorro total de material. La figura 14 muestra el volumen utilizado para fabricar las piezas estándar de los soportes, mientras que la figura 15 muestra el volumen de las piezas de nuestro diseño.

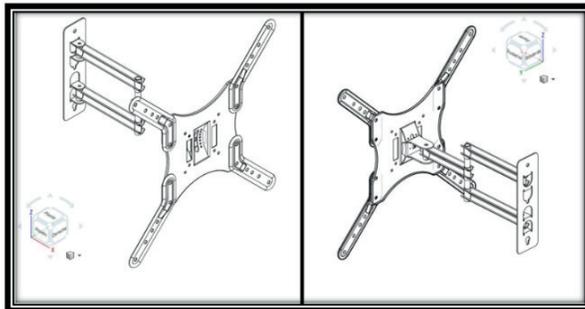
Con esta información proporcionada por el software de CAD se procede a estimar matemáticamente la diferencia total en el uso de material respecto al volumen. Se recuerda para este cálculo que hay que tomar en cuenta que para ese ensamble se necesitan una barra principal y dos barras secundarias; por lo tanto, el cálculo para el volumen de un soporte convencional se muestra. Con este cálculo se comprueba que tendríamos un beneficio en material del 20%.

Ecuación 9: Volúmenes (convencional y rediseñado)

$$\text{Volumen Convencional} = 17.166\text{cm}^3 + 2 \cdot (22.377\text{cm}^3) = 61.92\text{cm}^3 \quad (1)$$

$$\text{Volumen Rediseño} = 14.577\text{cm}^3 + 2 \cdot (17.246\text{cm}^3) = 49.069\text{cm}^3 \quad (2)$$

En la figura 14 se presenta como se vería el soporte de Tv, ensamblado con las barras modificadas diseño actual.



CONCLUSIONES

Después de tener el prototipo con la ondulación más profundizada en las barras secundarias el esfuerzo máximo al que se ven expuestas es de 320MPa. Después de considerar los esfuerzos máximos que recibe el ensamble en este par de piezas críticas, se determinó que 420MPa era un límite bastante bueno para un acero al bajo carbono que esté estirado en frío. En este caso las nuevas opciones son los aceros SAE1010, 1015 y 1020 estirados en frío, puesto que el límite de fluencia de estos materiales es de 42, 43 y

46 Kilogramos sobre milímetro cuadrado lo cual equivale aproximadamente a 412, 421 y 451 Mega Pascales; estas cantidades son muy cercanas a lo mostrado en los análisis de la figura 12, por lo que tomando en cuenta el factor de seguridad de 2, se le puede considerar estos como una opción fiable.

REFERENCIAS

Altenbasch, H. (2014). Actual Developments in the non-linear shell theory; state of the art and new applications of the six parameter shell theory. . Londres: Taylor & Francis Group.

Alva, P. (2018). Simposio Latinoamericano de Tenso-Estructuras. Lima.

Aranda Sánchez, A. E. (2018). Rediseño estructural de una cargadora frontal de un tractor agrícola como alternativa para la reducción de costo . Nuevo León: Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Basset, S. L. (2013). Estructuras laminares. . España: Universidad Politécnica de Valencia.

Bayou, N. (9 de febrero de 2022). Amazon Outlet. Obtenido de https://www.amazon.com.mx/NB-North-Bayou-compatible-capacidad/dp/B08C9JVFJF/ref=asc_df_B08C9JVFJF/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=451019505516&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=564524796327465237&hvpones=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1

Burns, R. W. (2000). John Logie Baird: Television Pioneer (No. 28). Let.

C.V., E. S. (20 de Mayo de 2021). Venta de Soportes para pantalla. Obtenido de <https://www.steren.com.mx/tv-y-video/soportes-para-pantalla>

Capellán, G. (7 de Junio de 2019). La Ingeniería Estructural en la Innovación de Estructuras Ligeras. Pasado y Presente. Obtenido de Programa de Seminarios del Máster de Estructuras de Edificación: Departamento de Estructuras y Física de la Edificación de la UPM. : <https://www.youtube.com/watch?v=6JFPJAAMgIM>

Druker, A. (2002). Clasificación de Aceros (Segun Normas SAE). Misiones: Universidad Nacional de Misiones.

Joshi, S. &. (2012). Evolution and future generation of TV. International Jvnl of Modern Education and Computer Science. 4(4), 50.

Morales, K. H.-C. (2019). Desarrollo Diseño y optimización de la estructura mecánica de un brazo robótico antropomórfico desarrollado con fines educativos. Revista UIS Ingenierías, 18(4), 193-208.

Mounts, S. (8 de febrero de 2022). Amazon Outlet. Obtenido de https://www.amazon.com.mx/Soporte-articulado-pulgadas-Samsung-compatible/dp/B08N11G51J/ref=asc_df_B08N11G51J/?tag=gledskshopmx-20&linkCode=df0&hvadid=547107012915&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=564524796327465237&hvpones=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=

OEVEO. (12 de Junio de 2021). VESA Wall Mounting Standards. Obtenido de <https://www.oveeo.com/content/320-all-about-the-vesa-pattern>

Pietraszkiewicz, W. &. (2013). Structures: Theory and Applications: Volume 3 . (Vol. 3). CRC Press.

Rodríguez, D. (2015). Cubiertas Laminadas en Paraboloides Hiperbólicos. Coruña: Universidad de Coruña.

Schlaich, M. (2018). Shell bridges-and a new specimen made of stainless steel. . Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 59(3), 215-224.

Servicio Industrial S.A. de C.V. (2018). Tabla de Propiedades de los Aceros SAE. Estado de Mexico: Aceros SISA.

Solís, E. (2019). Apuntes de Clase: Diseño e Ingeniería Asistido por Computadora. . Cd. Juárez, Chih. México.

Vanegas, L. (2018). Diseño de Elementos de Máquina. . Colombia: Colombia: Editorial Universidad Tecnológica de Pereira. Pp.74-78.

Xiangyang, S. (3 de mayo de 2022). Tv Mount and use in Car, CN204664810. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN159324152>

Zuobin, H. (8 de mayo de 2022). Tv Support, CN206647721. Obtenido de <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN207840110>