

# Optimización de Diseño de Estructuras de Estantería

---

J.F. Campos, R. Rodríguez, UCA.

**Resumen** —En este artículo se presenta un ejemplo de optimización de un producto usando cálculos y simulación por computadora, reduciendo el proceso de prueba de prototipos. Se describen los puntos de mejora, todos los pasos seguidos para establecer y validar un modelo digital a través de un proceso experimental, los pasos para usar este modelo para la estimación de capacidad de carga y modificación virtual del producto original. Entre los pasos para establecer el modelo digital, también se describe la metodología experimental para la obtención de datos de caracterización del material utilizado como insumo para la elaboración del modelo digital. Al final de este artículo, se establece los beneficios logrados con el proceso a la empresa patrocinadora, los cuales pueden ser extrapolables a otras empresas que se dediquen a la manufactura de productos de diseño original y no maquilado.

**Índice de términos**—Diseño, estantería, estructura, pruebas de materiales, optimización, simulación por computadora, validación de modelo digital.

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la empresa DarKolor de El Salvador, la cual suministró el material, información y apoyo necesarios para el desarrollo de este proyecto.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de diseño de un producto de calidad es la sucesión de ciclos iterativos de diseños preliminares. Este proceso puede acelerarse y ser mucho menos costoso en la medida se cuente con la información suficiente para un diseño adecuado. El objetivo de este trabajo era el de probar usar la modelación por computadora como un método para rediseño y mejora de un producto.

Se buscó una empresa con un producto probado en el mercado, para buscar puntos de mejora mediante esta aproximación de ingeniería. Una vez ubicada, se determinó que una de sus necesidades era la de contar con un cuadro de selección de calibre de lámina que permita ajustar el diseño ya

existente a los requerimientos de cargas para productos específicos, en los cuales se determinan distintas alternativas de configuración de chapas para lograr mayores rangos de carga y poder tener una serie de posibilidades de capacidad para la que la estructura sea determinada.

Se utilizaron métodos de simulación tanto teóricos como digitales para predecir comportamientos sin necesidad de construir físicamente las estructuras con los que se puede tener certeza y confiabilidad de los resultados.

Para la obtención de estos objetivos se hizo uso de equipos para la determinación de propiedades, cargas y deflexiones que caracterizaban a la estructura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Entre los principales materiales y equipos utilizados para la realización de pruebas y mediciones se tienen:

1. *Marcos de estructura.* Para sujeción de modelo de prueba.
2. *Máquina universal.* Para determinación de propiedades.
3. *Probetas de material de acero rolado en frío.*
4. *Extensómetro.* Para hacer mediciones lineales de deformación.
5. *Balanza.*
6. *Ángulos.* Utilizados con el fin de representar restricciones.
7. *Software Autodesk Inventor.* Utilizado para simulaciones digitales.

### A. Estudio sobre la estructura.

Debido a que las simulaciones requieren características de propiedades mecánicas, formas y tamaños de la estructura, se procede a investigar cada una de ellas para que exista correlación entre el método digital y físico.

Con la estructura inicial a optimizar, se obtuvieron sus dimensiones, materiales, formas de unión, rango de carga, etc. Proporcionados por el personal de la empresa con la finalidad de tener la información suficiente para definir un modelo tanto teórico como digital.

Por medio de una investigación preliminar de perfilera se constato que el material utilizado es el más sencillo en el mercado, con lo cual se descarto la posibilidad de reducir costos de fabricación.

Descartando la opción de reducción de costos de fabricación, esta etapa del estudio se enfocó en el aumento de capacidad de carga y la reducción de deflexión.

El perfil utilizado es tubería industrial cuadrada de acero fabricada con lámina rolada en frío en piezas de 6000 mm de largo. La estructura está formada por dos columnas hechas por un perfil cuadrado de 19.05 mm (0.75 pulg) de lado, chapa 22, con un peso de 2.46 kg por unidad.

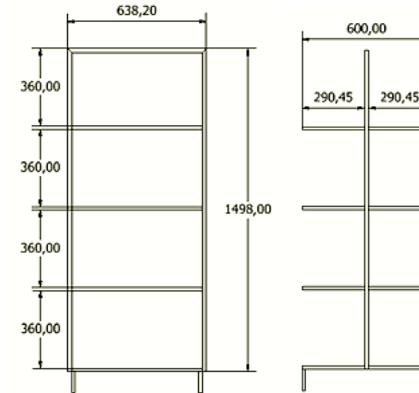


Fig. 1 Dimensiones y geometría inicial de estructura perteneciente a DAR KOLOR

En las columnas se sujetan, por medio de soldadura, cuatro marcos construidos con perfil cuadrado de 12.7 mm (0.5 pulg.) de lado, chapa 22 y peso de 1.87 kg por unidad. La base está hecha con perfil cuadrado de 19.05 mm (0.75 pulg.) de lado, chapa 22, soldada a las columnas con 4 apoyos ubicados en cada esquina de ésta. La figura 1 muestra las dimensiones generales de la estructura de la estantería. Cada marco de las bandejas está formado por cuatro tubos soldados en sus esquinas entre sí.

Explorando, a través de entrevistas y evaluaciones técnicas, las diferentes etapas de producción de la estantería, es decir desde el diseño, obtención de materia prima y construcción se encontraron los métodos de evaluación de mejora analizados de la siguiente forma:

Cambio porcentual de evaluación de mejora =  $\frac{\Delta}{X} \cdot 100$  (1)

Donde:

: Variable inicial.

: Variable luego de cambios en estructura.

Donde las variables que se tomaron en cuenta son: disminución de deflexión, es decir obtener un menor desplazamiento vertical del marco en el punto donde se aplica la fuerza, aumento de capacidad de carga en las bandejas y estructura completa, disminución de volumen para lograr una disminución en costos de envío.

Con información perteneciente a la empresa DarKolor se estimó una capacidad de carga actual de 16 kg representando 16 litros de agua ubicadas en cada bandeja de la estantería. Se creó un modelo teórico de la estructura inicial teniendo como base un análisis de deflexiones y esfuerzos de estructuras indeterminadas. Se llevó a cabo un análisis por medio del teorema de Castigliano[3] y un análisis de pandeo de columnas [1] cargadas a compresión por carga excéntrica.

Se construyó un modelo digital de la estructura en estudio con ayuda del software de simulación Autodesk Inventor mostrado en la figura 2. Ambos modelos, deben involucrar el uso de iguales propiedades físicas y mecánicas, cargas y direcciones de ella para que el análisis de resultados sea congruente entre sí.

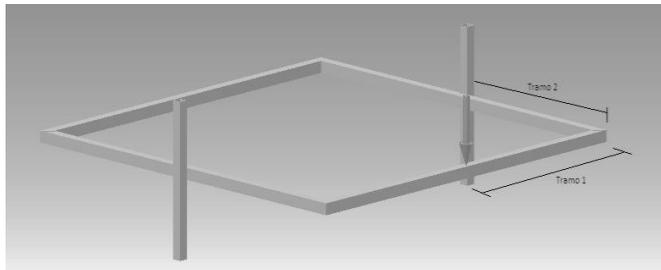


Fig.2 Aplicación de fuerza para ambos modelos.

### B. Realización de pruebas.

Se realizó una estructura con ayuda de soldaduras, ángulos, barras de acero y otros. Para poder determinar la deflexión con la aplicación de fuerza en el punto ya mencionado en figura 3.

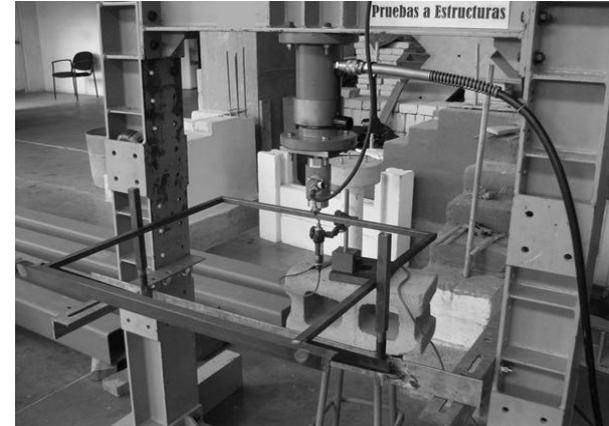


Fig. 3 Marco construido para determinar deflexión.

Fue de suma importancia la determinación de propiedades del material, ya que éstas eran requeridas por el software para llevar a cabo la simulación y obtener los datos reales.

Para determinar las propiedades del material se sometió a pruebas experimentales bajo normas establecidas por la ASTM [5][6].

Las propiedades requeridas para el estudio fueron las siguientes:

1. Módulo de elasticidad.
2. Esfuerzo de fluencia.
3. Esfuerzo último
4. Coeficiente de Poisson.
5. Densidad.

También se generó en el simulador una estructura igual a la

estructura analizada para poder aplicarle todas las restricciones y poder tener resultados fiables.

Se determinó también la mejora de colocar soportes entre la bandeja inferior y la columna logrando así que la deflexión medida en la columna horizontalmente sea menor.

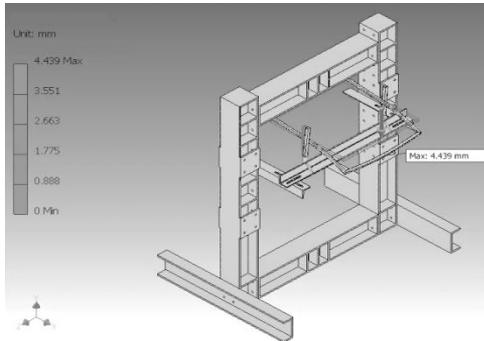


Fig. 4 Marco construido en AUTODESK INVENTOR.

#### C. Tabla de selección de calibre.

Se realizó una tabla de consulta para la selección de calibres de acuerdo a la carga que la estructura será destinada. Lo anterior implica que si el estante estará designado a soportar cargas pequeñas, el calibre del perfil de la estructura debería seleccionarse adecuarse a la carga [4]. De la misma manera, no se deberá seleccionar una herrajería que comprometa a la estructura a sufrir daños irreparables y consecuentemente de los productos sobre ella colocados cuando éstos representan grandes magnitudes de carga.

Para la elaboración de dicha tabla se han tomado en cuenta factores de seguridad con los cuales la estructura se diseñó para desempeño en un rango de carga que soporte circunstancias imprevistas donde se dejen caer productos sobre las bandejas o apoyo de personal o usuarios en la misma. El factor de seguridad es seleccionado para permitir

que la estructura no se encuentre en el límite de la falla. Se establecieron dos factores de seguridad: uno de diseño de 2.015 y otro factor de impacto de 1.25 [2].

TABLA 1.  
VARIACION DE CALIBRES PARA TABLA DE SELECCIÓN.

Tubo ½ pulg		Tubo ¾ pulg	
Columna		Bandeja y Patas	
Chapa	Medida [mm]	Chapa	Medida [mm]
22	0.7	22	0.7
21	0.8	22	0.7
21	0.8	21	0.8
20	0.9	21	0.8
20	0.9	20	0.9
18	1.2	20	0.9
18	1.2	18	1.2

#### D. Estructura desmontable.

Una de las propuestas a incluir es la realización de una estructura desmontable con la cual se pretende tener en cuenta una reducción de costos en cuestión de transporte. Se tuvo en cuenta la facilidad de fabricación de la pieza, facilidad de montaje en el lugar de despacho. La estructura, tal como se tenía inicialmente maneja un volumen 78% más grande que el propuesto, al tener un volumen grande aumenta el coste de transporte.

La estrategia utilizada consiste en realizar una propuesta y estudio de una pieza que logre separar la estructura en dos componentes: las columnas y las bandejas; teniendo en cuenta que la fabricación de dicha pieza cuente con facilidades de manufactura y buen desempeño. La pieza propuesta en conjunto con los remaches tipo “pop” cumplen con las restricciones necesarias para tener buen desempeño. La pestaña inferior del acople impide, al igual que la celosía

superior, que la bandeja se levante de la parte contraria de donde se aplica la carga por acción de un momento. Los remaches ayudan a restringir el deslizamiento de la bandeja sobre el acople.

Teniendo en cuenta que el diseño de la estructura inicial no considera aspectos de transporte de la estructura y el manejo de ella, se presenta una recomendación que reduciría el impacto económico que produciría el transporte masivo de dichas estructuras. No sólo se consideran cuestiones de acoplamiento entre bandeja y columna, también se involucra la disminución de la concentración del esfuerzo en la soldadura; por tal razón la geometría del acople proporcionado debe facultar la mayor uniforme distribución del esfuerzo posible.

Teniendo en consideración todos los aspectos mencionados anteriormente se rediseñó el modelo final de la pieza de acople.

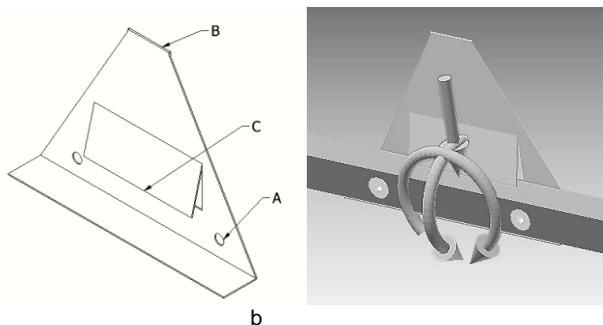


Fig. 5 a) Pieza final de acople para estructura desmontable. b) Reacciones resultantes en el acople.

El acople consiste en una lámina de acero rolando en frío con un espesor de 0.75 mm. Dispone de dos agujeros (como se observa en figura 5 con el indicativo “A”) que se utilizan para la restricción del deslizamiento de la bandeja con ayuda de remaches tipo “pop”. La pieza cuenta con una celosía (C) que tiene la característica de impedir que, debido al momento

flector producido por la carga excéntrica en la parte frontal, la bandeja se levante por la parte posterior. De igual manera, la pestaña inferior impide que la bandeja se incline del lado donde se aplica la carga.

La ubicación de un cordón de soldadura de la pieza se puede observar en la figura 5 con la letra “B”. Un cordón de soldadura similar es ubicado en la parte inferior de la pieza como medio de unión con la columna (no se observa). Ambos cordones deben ser colocados para disminuir los esfuerzos por momento flector ocasionados. Teniendo en cuenta todos los datos se determina una comparación en volúmenes de las dos estructuras tanto la inicial como la desmontable permitiendo así una comparación razonable.

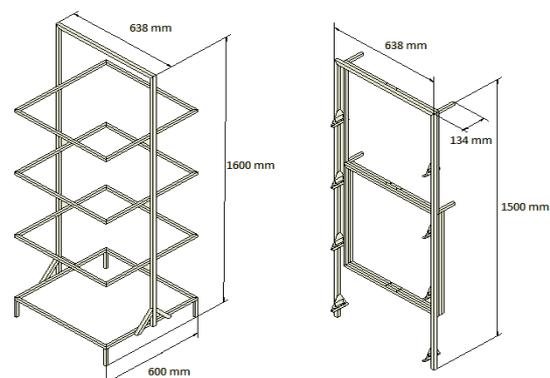


Fig. 6 Comparaciones de volúmenes de las estructuras.

## RESULTADOS Y DISCUSION.

Los resultados obtenidos para la determinación de propiedades del material tras varias pruebas realizadas a una serie de probetas de acero rolando en frío se muestran en la siguiente tabla:

TABLA II.  
RESULTADOS DE PRUEBAS A MATERIAL.

Esfuerzo de Fluencia ( $S_y$ ) [MPa]	$269.00 \pm 2.98$
Esfuerzo Último ( $S_u$ ) [MPa]	$321.00 \pm 3.56$
Modulo de Young ( $E$ ) [GPa]	$235.50 \pm 0.24$
Razón de Poisson ( $\nu$ )	$0.3400 \pm 0.0002$
Densidad [ $\text{kg/m}^3$ ]	$7450 \pm 68$

Una comparación del grado de deflexión obtenido entre las diferentes pruebas (con celda de carga electrónica, con pesos separados y por medio de software simulador) se puede observar en gráfico de la figura 7. La diferencia entre las capacidades de carga del modelo inicial con las capacidades de carga obtenidas posteriormente a las modificaciones se observa en la gráfica de la figura 8.

Como último cálculo para la selección de calibre se incorporó un 25% de error constante debido a que los valores obtenidos por medio de la prueba con los de la simulación mantiene constante esta desviación. La tabla 3 de selección de calibres presenta las combinaciones de calibres recomendados según la magnitud del peso del producto para el que se requiera el estante.

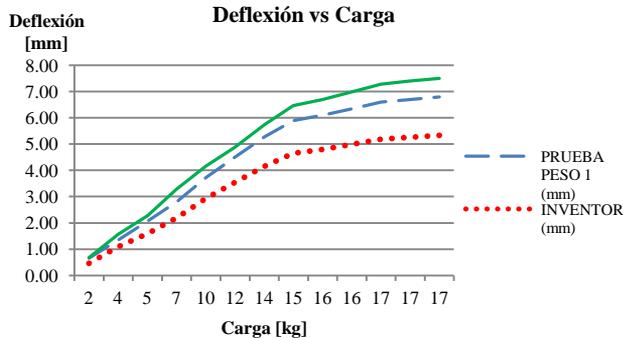


Fig. 7 Gráfico de comparación de deflexión entre pruebas.

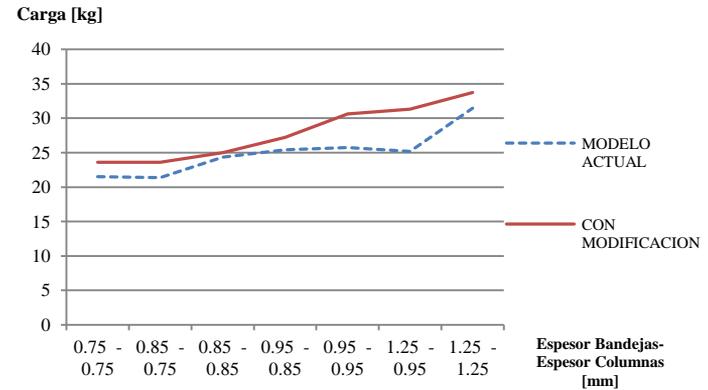


Fig. 8 Gráfica de capacidades de carga entre modelo actual y el modificado.

TABLA III.  
TABLA DE SELECCIÓN DE CALIBRE.

		Bandeja				
		Chapa	22	21	20	18
Columna	22	0- 6 kg				
	21		6 - 7 kg			
	20		7 - 9 kg	9 - 11 kg		
	18					11 - 12 kg

## CONCLUSIONES.

1. En vista que se realizaron numerosas pruebas a manera de comprobar la exactitud de medidas, es recomendable afinar la escala de los equipos de medición (como las celdas de carga) para obtener mayor precisión en la medida de carga de las pruebas de tensión y de ésta manera evitar recurrencias a métodos alternos verificación.

2. Al término del planteamiento de mejoras, respecto al parámetro de deflexión ocasionado por la aplicación de la carga ubicada en el punto de control (lugar más desfavorable para aplicar la carga debido a los momentos producidos), se mejoró en un 18% reduciendo su magnitud con la incorporación de los soportes entre la bandeja inferior y la columna. Valores altos de dicho parámetro indicaban falta de rigidez de la estructura y ocasionaba incremento del esfuerzo debido a una concentración del mismo en la unión de la bandeja inferior con las columnas.

3. El parámetro de la capacidad de carga de la estructura inicial, se aumentó un promedio de 10% con la incorporación de los soportes entre la bandeja inferior y la columna.

4. El coste por transporte de la estructura puede verse disminuido en gran medida, debido a que el volumen por unidad de la estructura desmontable propuesta es 78% menor que la estructura inicial. El grado de optimización del parámetro referido al volumen resultó ser bastante elevado lo que se traduce como una reducción en la incidencia de flete de 17% (cotización realizada en agosto del año 2012), por lo que se recomienda la implementación de ésta medida.

5. Para obtener una mayor capacidad de carga a las establecidas y una menor deflexión se sugiere utilizar soportes para todas las bandejas, esto permite que el esfuerzo producido en las bandejas sea transmitido a la columna. Cabe mencionar que al realizar dichos cambios, la chapa de la columna debe de ser la máxima posible para poder resistir mayores esfuerzos. Estos soportes se colocaran de igual manera que los soportes propuestos para la bandeja inferior. Se recomienda realizar las pruebas pertinentes a este diseño propuesto previa implementación para garantizar su óptimo desempeño. Cada soporte debe ser elaborado con el mismo material que se utilice en la columna según la selección de la tabla 3.

6. Se sugiere que previo a la implementación de la pieza desmontable se realicen pruebas físicas a la estructura como medida para garantizar el óptimo desempeño de la propuesta realizada. La pieza desmontable debe ser hecha de lámina de acero troquelada y doblada en frío. Debe ser unida a la columna por medio de dos cordones de soldadura, uno en la parte superior y otro en la parte inferior de la pieza.

## REFERENCIAS

### Libros:

[1] Budynas, Nisbett; 2008; Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, pág. [157-177], [1020-1024], [441].

[2] Bernard J. Hamrock; *Fundamentals of machine elements*; pág. [8 - 9], [549-557], vol. 3, abril 1988.

[3] Juvinall, *Fundamentals of Machine Component Design*, pág. [18 -19],

### Reportestécnicos

[4] (2012) Sitio web de Aceros de Guatemala. [Online]. Disponible: <http://www.acerosdeguatemala.com/producto-nuevo/perfiles-intupersa-ag/tuberia>

[5] (2012) Sitio web de Aceros de Guatemala. [Online]. Disponible: <http://www.acerosdeguatemala.com/producto-nuevo/perfiles-intupersa-ag/tuberia>

### Normas:

[6] 2009, ASTM E8 / E8M - 11 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

[7] 2010, ASTM E132 - 04(2010) Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature.

## BIOGRAFÍAS

**Rodríguez, Reynaldo**, salvadoreño, estudiante de ingeniería mecánica en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”.

**Campos, Juan Antonio**, salvadoreño, estudiante de ingeniería mecánica en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”.