

Diseño óptimo de un semirremolque para vehículos de carga

Optimal design of a semitrailer for cargo vehicles

VÍCTOR RUIZ R.

Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería Mecánica. Investigador del grupo DISING, Docente Asistente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.

Contacto: veruizr@udistrital.edu.co

EFRAÍN ACERO

Tecnólogo Mecánico. Investigador del grupo DISING y el semillero SIMEC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia.

Contacto: efrain_acero@hotmail.com

Fecha de recepción: 28 de Julio de 2012

Clasificación del artículo: Investigación

Fecha de aceptación: 1 de Octubre de 2012

Grupo de Investigación: DISING y SIMEC

Palabras clave: *Optimización topológica, QFD, semirremolques*

Key words: *Topology optimization, QFD, semitrailer.*

RESUMEN

El presente artículo presenta muestra el proceso de diseño orientado a optimizar el comportamiento mecánico de un semirremolque del tipo plataforma para vehículos de carga. Se utiliza el QFD (Despliegue de Función de Calidad, por sus siglas en inglés) para establecer requerimientos de los clientes de este tipo de equipos, . a A través del uso de herramientas CAD CAE se obtiene el comportamiento mecánico del semirremolque y a partir de este resultado se planteó una estrategia de optimización topológica con el fin de disminuir peso en las vigas estructurales sin comprometer la resistencia mecánica del equipo. Se logró una reducción cercana al 13% de la masa de todo el conjunto de partes del semirremolque

ABSTRACT

This paper presents the design process aimed at optimizing the mechanical behavior of a platform type semitrailer for cargo vehicles. It was used the QFD (Quality Function Deployment) in order to establish customer requirements for this type of equipment, through the use of CAD CAE tools get the mechanical behavior of semitrailer and from this results was followed a topological optimization strategy in order to reduce weight in the structural beams, without compromising mechanical strength of the equipment. Achieved a reduction of about 20% of the mass of the semitariler's semitrailer's entire set of parts.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia el transporte de carga pesada por carretera se ha venido incrementando permanentemente tal como se evidencia en los documentos presentados por la Federación Colombiana de Transportadores por Carretera COLFECAR[1]. Sin embargo, las problemáticas que afronta este sector son múltiples y complejas teniendo en cuenta que hay una gran cantidad de carga que viaja desde los puertos hacia el interior y la infraestructura vial es inferior a la demanda de la misma. Así mismo, en los últimos años se encuentran desarrollando planes de mejoramiento de la infraestructura con inversiones importantes, por lo que se han aumentado los precios en peajes reduciendo los márgenes de ganancia y que aumentando los costos operativos, sumado a que en los últimos cuatro años el precio del combustible se ha ido incrementando permanentemente asociado a los altos costos del petróleo[2].

Los semirremolques tipo plataforma y tanques para vehículos pesados son los más comunes, especialmente los del tipo 3S2 y 3S3 que corresponden a semirremolques de dos y tres ejes para vehículos de tres ejes de hasta 52000 kg de peso bruto vehicular [3]. El remolque por lo tanto tiene una incidencia directa en los márgenes de utilidad del transportador debido a que hace parte del peso bruto vehicular.

Los grupos de investigación consideraron importante contribuir en el desarrollo de nuevas estrategias de diseño para este tipo de productos tecnológicos, basados en el análisis matemático y computacional para ingeniería, con el fin de desarrollar remolques para los cuales se disminuya su peso con el fin de aumentar la capacidad de carga como alternativa en el mejoramiento de los márgenes de utilidad para el sector transportador.

2. SEMIRREMOLQUES DE TIPO PLATAFORMA

La plataforma es la más general de todas las aplicaciones, puede tener dos o tres ejes traseros y su piso permite una gran diversidad de carga a transportar. Sus dimensiones máximas permiten llevar hasta un contenedor de aproximadamente 35 Ton. Estructuralmente está compuesto de dos vigas longitudinales que se unen por medio de puentes transversales que van conectados al marco exterior. Dada su configuración robusta se convierte en un buen objetivo para ser optimizada con el fin de mejorar la capacidad de carga y disminuir los costos de operación por desgaste de ruedas y combustible. El estudio, entonces, se dedicó a mejorar las condiciones de diseño de este tipo de semirremolques, en particular los del tipo 2S3 y 3S3, que manejan las mayores capacidades de carga, ver figura 1.

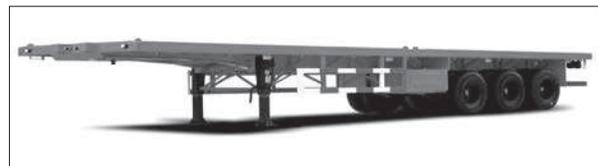


Figura 1. Plataforma multipropósito

Tomado de: <http://xgma-hi.en.made-in-china.com>.

Un semirremolque no es un equipo realmente complicado estructuralmente. Estos tienen principalmente dos vigas longitudinales que son la columna vertebral del mismo. Las vigas son de perfil en I, están conformadas por el patín superior, el alma y el patín inferior. La altura del alma varía teniendo en cuenta que se debe permitir un montaje apropiado sobre el tracto camión, por lo que en la zona del acople la viga es más corta que en el resto de la longitud del equipo. Esto es permisible dado que es una zona donde el camión ayuda a soportar en parte el peso del semirremolque, ver figura 2.

3. DISEÑO ÓPTIMO

En las últimas décadas la optimización en el diseño de productos toma particular relevancia teniendo

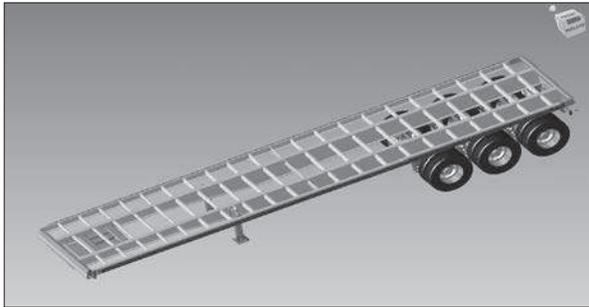


Figura 2. Semirremolque tipo plataforma.
Fuente: Elaboración Propia

en cuenta las necesidades de desempeño y comportamiento cada vez más exigente de los diferentes clientes, así como de la reflexión hacia el uso razonable de los recursos, renovables o no, y los valores agregados que puede tener un producto en un mercado competitivo. Todo lo anterior ayuda a establecer las condiciones bajo las cuales se organizan los procesos de diseño de forma tal que se requiera diseñar pensando en minimizar o maximizar características propias del elemento, cumpliendo efectivamente con todos los requerimientos funcionales y de comportamiento necesarias para un buen desempeño.

3.1 Optimización

El concepto de optimización se define como la necesidad de minimizar o maximizar una función, denominada función- objetivo, cumpliendo simultáneamente con una serie de funciones que restringen la solución. La formulación general de una tarea de optimización se define en las ecuaciones (1) y (2) [4].

$$\text{Minimizar } z = F(x), F = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (1)$$

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T$$

$$\text{Sujeto a } G(x) \leq 0, G = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)] \quad (2)$$

$$H(x) = 0, H = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_n(x)]$$

Donde F corresponde al conjunto de funciones objetivos que puedan presentarse, de tal manera que

si se tiene una única función objetivo tenemos un caso de optimización simple, y si se tienen varios se habla de *optimización multiobjetivo*. Corresponde al vector de variables de diseño, es decir, todas las variables que pueden definir el comportamiento de un sistema o proceso, $G(x)$ y $H(x)$, conforman el conjunto de restricciones de desigualdad e igualdad que deben cumplirse necesariamente, de forma tal que se busca obtener el o los conjuntos de valores X que satisfagan las restricciones planteadas en (2).

3.2 Métodos de solución al problema de optimización

Dependiendo de las características de las ecuaciones que conforman el problema, se debe escoger la forma como puede ser solucionada, así, existen algoritmos para optimización lineal y no lineal, con variables continuas y discretas y para una o múltiples funciones- objetivo. De forma tal que la tarea de optimizar reviste dos etapas fundamentales e igualmente importantes. Plantear apropiadamente el problema de optimización y resolverlo con el algoritmo más adecuado.

Un algoritmo de optimización generalmente parte de un conjunto de posibles valores solución y a partir de allí por métodos iterativos evalúa el cumplimiento de las ecuaciones de restricción. De acuerdo con alguna lógica planteada se van cambiando los valores de las variables hasta que se llegue a un punto donde se considere que efectivamente resuelven el problema. Cuando las condiciones del problema corresponden a ecuaciones lineales, se utilizan los métodos de programación lineal que llevan a obtener respuestas determinísticas a los problemas. Cuando las condiciones son no lineales los métodos de solución son diversos. Unos de los más utilizados son los diferenciales o basados en el gradiente. Sin embargo, se han desarrollado técnicas no diferenciales comprobando que se ajustan mejor a las restricciones.

3.3 Optimización estructural

La optimización estructural intenta desarrollar técnicas de solución a problemas de ingeniería que buscan reducir peso y aumentar resistencia tanto estática como dinámica a diferentes cargas. Las técnicas de optimización estructural pueden ser adoptadas en varios aspectos dependiendo de los campos de aplicación donde será utilizado. La optimización estructural está dividida en varias categorías: la optimización de tamaño o dimensional, la optimización de forma y la optimización topológica, [4], [5]. Es muy importante saber que método de optimización se utilizará y esto depende de varias condiciones como lo son: el tamaño, objetivos (resultados a obtener), restricciones de diseño, número de variables en el diseño, entre otras [4], [6].

3.3.1 Optimización topológica

La optimización topológica es un tipo especial de optimización estructural de forma. El proceso de creación es realizado cuando los diseñadores necesitan encontrar una nueva configuración estructural para un uso particular, como se ve en la figura 3. En un problema de optimización topológica, con un dominio de diseño dado, el objetivo es encontrar el mejor diseño estructural que proporcione la función objetiva óptima deseada, por ejemplo: el peso, la conformidad del sistema, la deflexión y la frecuencia natural, mientras satisface las restricciones de diseño. En un proceso numérico por el uso del *método de elementos finitos (FEM)* para análisis estructural, el diseño óptimo topológico puede ser ejecutado individualizando una estructura en un número de elementos finitos conectados. Las variables de diseño determinan la distribución de la densidad del elemento, lo cual significa que los elementos con densidad cercana a cero representan huecos en la estructura en donde otros elementos indican la existencia de material de estructura [7].

En forma discreta corresponde a una representación enmallada de blanco y negro de la geometría, con “píxeles” (o voxeles) dado por la discretiza-

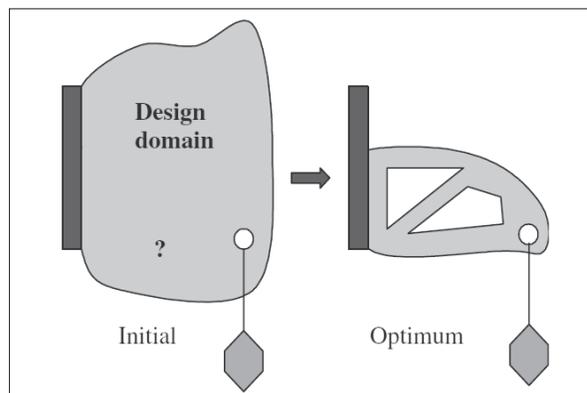


Figura 3. Optimización topológica.

Tomado de: Bureerat & Kuananote 2005

ción de elementos finitos. Por lo tanto, los problemas de optimización topológica deben ser planteados como problemas de programación de números enteros con 0 - 1 como variables de diseño discreto. El problema de optimización topológica, formulado de esta manera, es difícil que sea resuelto directamente usando enfoques de tipo derivativo o basado en gradientes. Se ha sugerido que los problemas de tipo 0 - 1 deberían ser más flexibles por la introducción de variables de diseño continuas [5], lo cual hace posible encontrar sensibilidades continuas de las funciones objetivo con respecto a las variables de diseño, y entonces muchas aproximaciones de optimización de tipo continuo pueden ser permitidas para resolver el problema de optimización topológica. Una vez que dicho problema se lleva de esta manera, regiones grises con densidades intermedias entre 0 y 1 podrían aparecer en las topologías óptimas. El esquema de la penalización es empleado a menudo para suprimir las densidades intermedias. En general, dos estrategias son comúnmente usadas: una es la microestructura o aproximación basada en la homogenización. La otra es el método de densidad en el que dos típicas formaciones son material sólido isotrópico con penalización (*SIMP*) y aproximación racional de propiedades de materiales (*RAMP*) [8]. Existen muchos más métodos en la literatura que están orientados a la solución del problema de optimización topológica, donde los métodos evolutivos han

logrado grandes avances [5], [9]. Sin embargo, se definió el que se utilizó en el presente trabajo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Análisis QFD

El QFD se fundamenta en la búsqueda de las necesidades del usuario, las cuales son trasladadas dentro de las acciones de diseño y comunicadas a través de todo el equipo de trabajo[10]. Se constituye en una técnica de apoyo importante para la toma de decisiones en la primera etapa de diseño, con el fin de llegar a desarrollar productos que involucren características de calidad que maximicen la satisfacción del cliente.

Con el fin de solventar de una manera más eficiente

el desarrollo de semirremolques para vehículos de carga pesada se han venido adelantando proyectos que cambian u optimizan este tipo de equipos. Diferentes investigaciones, [11], [12], [13] han propuesto avances en torno al análisis del diseño de este tipo de estructuras. Sin embargo, el camino recorrido no ha tomado en cuenta la opinión del usuario de una manera procedimental. Es por eso que el acercamiento al QFD es válido si se garantiza que el proyecto de investigación está orientado a resolver de manera específica lo que el cliente desea en términos de unos adecuados requerimientos de diseño.

En el análisis realizado para el proceso de diseño de un semirremolque se identificaron los clientes potenciales con el fin de proyectar una solución acorde con las necesidades reales del sector de transporte pesado. Se hizo un diagnóstico del sector con el fin de poder comparar lo que existe en

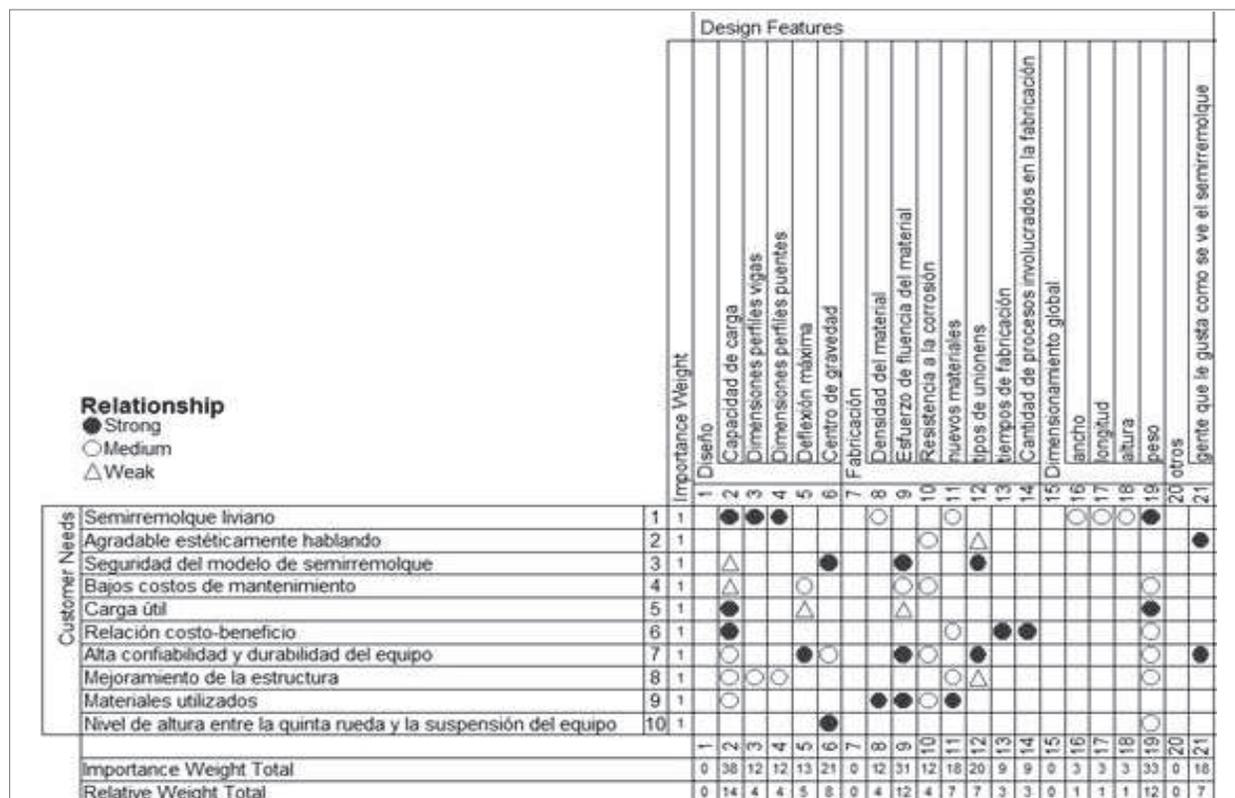


Figura 4. HOQ para el diseño del semirremolque

Fuente: Elaboración Propia

materia de semirremolques con el diseño que se pretende lograr.

En la tabla 1, se resumen los requerimientos del cliente definidos a partir de encuestas realizadas a carroceros, transportadores y conductores de tractocamiones y que utilizan plataformas como semirremolques. Luego se estableció la matriz principal teniendo en cuenta la secuencia adecuada de construcción para así obtener los valores objetivos de los requerimientos de diseño. En este artículo se presenta información cualificada y cuantificada en los diferentes procesos que anteceden la construcción de la casa de la calidad (HOQ) para el proceso de diseño de un semirremolque. La casa de la calidad es una matriz que provee un mapa conceptual para el proceso de diseño que involucra varios aspectos a tener en cuenta en un proceso de ingeniería concurrente. Los tres más importantes se conforman a través del proceso de construcción de la misma y son: la especificación de las funciones objetivo para el producto que en este caso es un semirremolque para vehículos de carga pesada, el comportamiento de la competencia frente a esos objetivos y finalmente lo importante desde el punto de vista del cliente; ver figura 4.

Tabla 1. Requerimientos de cliente.

Nº de req.	Requerimiento
1	Semirremolque liviano
2	Agradable estéticamente hablando
3	Seguridad del modelo de semirremolque
4	Bajos costos de mantenimiento
5	Carga útil
6	Relación costo-beneficio
7	Alta confiabilidad y durabilidad del equipo
8	Mejoramiento de la estructura
9	Materiales utilizados
10	Nivel de altura entre la quinta rueda y la suspensión del equipo

4.2 Resultados del análisis QFD

Los primeros resultados válidos para la especificación de diseño de un semirremolque se dieron en la realización de la encuesta. Allí el cliente manifestó con claridad que el tipo de semirremolque que más usa es el de tres ejes (S3). En segunda medida, el cliente respalda sin duda la garantía que le ofrece una marca reconocida. Respecto al establecimiento de los objetivos para el proceso de diseño del semirremolque se puede observar la prioridad con la cual se deben atacar los requerimientos de diseño especificados dentro de la matriz.

4.3 Comportamiento estructural de un semirremolque tipo plataforma

El análisis estático consistió en restringir apropiadamente el modelo y aplicar las fuerzas asociadas a la carga transportada por la plataforma. La fuerza aplicada fue la correspondiente a 35.000kg como el peso máximo normalmente transportado. Esta se aplicó en forma de presión sobre la cara formada por el piso de la plataforma. El mallado utilizado fue de elementos tetraédricos sin controlar en un mallado no muy denso dada la longitud del equipo. Los resultados de la simulación se muestran en las figuras 5 y 6. Los puntos de esfuerzo más críticos lógicamente se ubicaron cerca de los apoyos y en el cambio de altura del alma de las vigas. La magnitud del esfuerzo máximo es ubicado cerca del apoyo del acople es aproximadamente el 50% del

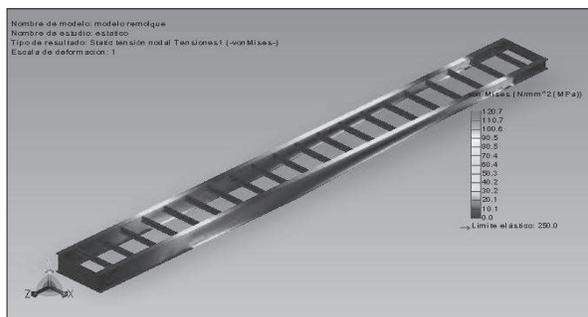


Figura 5. Esfuerzos inducidos en el conjunto de vigas. Geometría simplificada. Fuente: Elaboración propia.

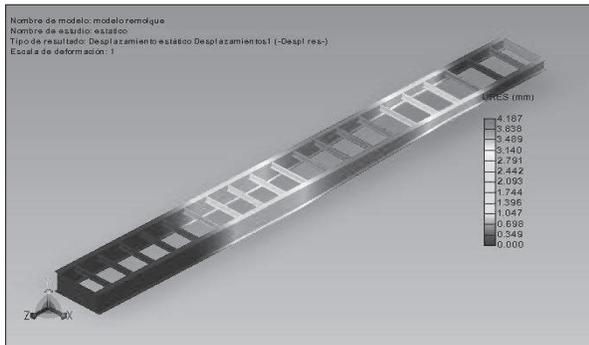


Figura 6. Deformaciones en el conjunto de vigas. Geometría simplificada.
Fuente: Elaboración propia.

límite de fluencia del material (Acero A36 $S_y = 250$ MPa).

Una vez revisados los resultados obtenidos y de verificar que los esfuerzos sometidos en gran parte de la estructura se encontró que son suficientemente bajos. Se buscará mejorar la condición que permita reducir peso al semirremolque sin afectar su capacidad para soportar las cargas apropiadamente. Se tiene en cuenta que es un equipo cuyas dimensiones son grandes y fabricado con materiales que lo convierten en una unidad con un peso considerable. Entonces, se evaluó a partir del aporte en masa de cada parte al peso total del semirremolque para poder orientarse en ese elemento evidenciando la importancia que se ha definido desde el análisis QFD implementado.

A partir del modelamiento del ensamble se evalúan las propiedades físicas tanto del ensamble como de cada pieza para así poder revisar su aporte a la masa total.

En la tabla 2 se resumen las masas y su aporte de las piezas más grandes dentro del semirremolque.

Tabla 2. Aporte en masa de las principales partes del semirremolque

Parte	Masa Kg	%
Puentes	460,53	17%
Vigas	1336,7	50%
Acoplador	263,3	10%

Parte	Masa Kg	%
Defensa delantera	44,46	2%
Defensa trasera	64,02	2%
Laterales marco	513,786	19%
Total	2682,796	

Las vigas longitudinales tienen el mayor compromiso de resistencia mecánica en el semirremolque y adicionalmente el conjunto de vigas aporta con el 50% de la masa del conjunto estructural del equipo. Para la viga el compromiso será el minimizar su masa, sin embargo, mantener la resistencia del elemento estructural es fundamental teniendo en cuenta su protagonismo en el comportamiento del semirremolque.

4.4 Optimización topológica

Dado que los requerimientos para desarrollar una simulación tridimensional son muy elevados debido al gran número de nodos y de grados de libertad que aparecen asociados a las dimensiones geométricas se decidió trabajar en un modelo 2D, asumiendo que la viga es geoméricamente simétrica y que el alma se considera lo suficientemente delgada con respecto a su longitud, para no esperar que se requiera exclusivamente un modelamiento 3D. Para implementar la optimización se habrán de tener en cuenta las condiciones de diseño de la viga en cuanto a restricciones geométricas, de movimiento y el tipo de carga aplicada. El problema de optimización que se plantea en este caso, utilizando elementos finitos, estará en buscar una distribución de material isotrópico con el fin de soportar cargas asociadas al peso del material transportado y ubicado en la plataforma. Como caso extremo, se considera el peso directamente soportado por las dos vigas y asumiendo que cada una soportará la mitad de la carga completa esto es 17.500kg.

$$\text{Minimizar } c(\rho) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon^T K(\rho) \varepsilon d\Omega \quad (3)$$

$$\text{Sujeto a } \int_{\Omega} \varepsilon^T K \varepsilon d\Omega = \int_{\Omega} f u d\Omega + \int_{\Gamma} t u ds$$

Donde K es la matriz de rigidez del modelo

F es el vector de cargas

T son las reacciones cercanas al apoyo

U es el vector de desplazamientos

ϵ es el vector de deformaciones

Ω es el dominio de Diseño

El método que se escogió para la optimización es el *SIMP* (Solid Isotropic Material with Penalization). Esta decisión se da frente a la facilidad de ser implementada en un entorno 2D, el costo computacional no es significativo con respecto a los Algoritmos Genéticos y las soluciones para una distribución de masa en un equipo tan grande como el que se trabaja da la posibilidad de obtener resultados con tolerancias aceptables. Para su implementación se decide utilizar el módulo de optimización del COMSOL que combinado con el módulo de Mecánica Estructural permiten obtener rápidamente soluciones integradas.

En el método SIMP la matriz de rigidez se puede expresar de la forma

$$K(\rho, x) = \rho(x)^p K_0 \quad (4)$$

Con $p > 1$ y las restricciones que se deben cumplir en el problema de optimización serán.

$$0 \leq \int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V \text{ y } 0 \leq \rho(x) \leq 1 \quad (5)$$

Donde p corresponde a la variable de penalización y $\rho(x)$ corresponde a la densidad como variable de control que estará definiendo en dónde se debe adicionar material “1” y en dónde no “0”. El valor de p varía de acuerdo con la *relación de poisson* [5].

Implementado el modelo para diferentes valores de p se obtuvieron los resultados presentados en la figura 8. Para valores cercanos a 3,0 se presentan distribuciones porosas que permiten percibir cómo sería la distribución de material. Sin embargo, después de un valor de p cercano a 4,0 empieza a definirse la distribución. En la figura cuando $p=4,5$ se logra la mejor definición. Para valores mayores no

hay cambios significativos en la distribución. En todos los casos la distribución muestra un requerimiento completo de material en la zona del acople y cerca al cambio de altura del alma, mientras que en la parte media y cercana al apoyo trasero se logra una distribución que ahorra una gran cantidad de material. La distribución de esfuerzos y deformaciones para el último caso se presenta en las figuras, en donde se encuentra un esfuerzo máximo de 198MPa cerca al apoyo trasero muy cercano al límite de fluencia del material. El desplazamiento máximo producido es de 18mm en la sección del cambio de altura. En la figura 7 se muestran algunas distribuciones obtenidas para diferentes valores de penalización.

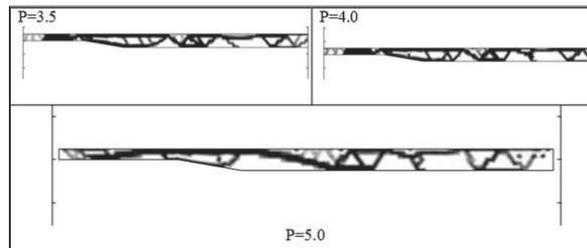


Figura 7. Optimización topológica de la viga del semirremolque para diferentes valores de penalización
Fuente: Elaboración Propia.

5. RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en la distribución se plantearon diversas posibles modificaciones para las vigas. Estas fueron trabajadas entre el equipo de diseño del proyecto junto con expertos en diseño de vigas de la empresa Talleres Torres.

Los criterios establecidos para el planteamiento de la solución utilizando la información obtenida fueron:

- Aligerar al máximo la viga y garantizar la resistencia de la viga.
- No modificar sustancialmente la conformación de las demás partes del semirremolque que interactúan con la viga.
- No incurrir en gastos o procesos adicionales para la conformación.

De acuerdo con lo anterior las soluciones propuestas buscaron retirar el material en zonas seguras de acuerdo con la optimización y teniendo en cuenta que la parte superior de las vigas viene atravesada por los puentes, no se previó retirar material allí, por lo que únicamente se hizo este proceso en la parte inferior de la viga en donde la altura del alma es mayor. Se definieron finalmente dos patrones de distribución. El primero utiliza triángulos isósceles de longitud 220mm para los lados iguales entre sí, y separados 15cm, alternando su dirección. Este patrón se repite 22 veces a lo largo de la viga. En la zona cercana al punto de esfuerzo máximo no se retiró material. El segundo patrón se orientó a utilizar una forma un poco más conservadora para este tipo de estructuras. Se decidió utilizar rectángulos con vértices redondeados. Después de probar diferentes tamaños se escogieron cuadrados de 200mm por lado distribuidos cada 50cm en un patrón de 9 repeticiones. Ver la figura 8:

Al hacer la implementación de las distribuciones sobre el semirremolque y compararlas incluyendo todo el conjunto de partes se llega a la tabla 3, en

la que se muestra que se logra efectivamente la reducción de masa llegando con el patrón triangular al 11% de reducción correspondientes a 301 kg sobre el peso total del equipo.

El análisis del comportamiento mecánico estructural se realizó para las mismas condiciones de aplicación de carga y muestra que las dos tienen una buena capacidad para soportar las cargas aplicadas. Sin embargo, se identifican esfuerzos inducidos más altos en el patrón rectangular. En la aplicación que utiliza un patrón triangular, el esfuerzo máximo se ubica en el orden cercano de los 200MPa, mientras que para el caso de la segunda alternativa este esfuerzo sobrepasa los 300MPa.

Se planteó un análisis de respuesta en frecuencia para la aplicación optimizada que busca verificar el comportamiento frente a frecuencias que se pueden producir en el vehículo e inducir fallas por fatiga del material. Las fuentes de vibración más comunes en este equipo se encuentran desde el tracto camión. Sin embargo, el acople se encuentra aislado mediante disipadores pasivos consistentes en láminas de caucho vulcanizado que rodean la unión en-

Tabla 3. Comparación de resultados de aportes de masa en cada solución propuesta.

Parte	Original		Patrón de triángulos		Patrón de rectángulos	
	Masa Kg	%	Masa Kg	%	Masa Kg	%
Puentes	460,53	17%	307,02	13%	307,02	12%
Vigas	1336,70	50%	1188,70	50%	1279,44	52%
Acoplador	263,30	10%	263,30	11%	263,30	11%
Defensa delantera	44,46	2%	44,46	2%	44,46	2%
Defensa trasera	64,02	2%	64,02	3%	64,02	3%
Laterales marco	513,79	19%	513,79	22%	513,79	21%
Total	2682,80		2381,29		2472,03	
Reducción de masa			301,51	11%	210,77	8%

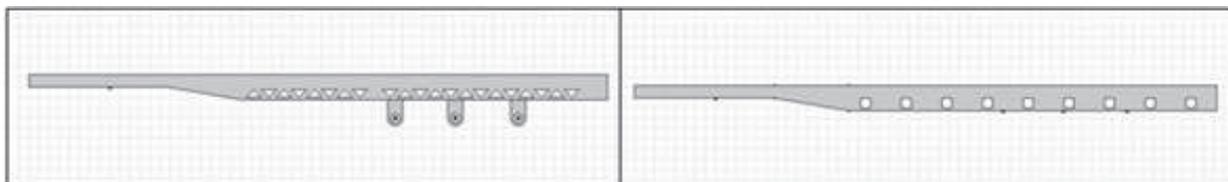


Figura 8. Solución de viga optimizada utilizando izq. un patrón triangular, der patrón rectangular.

Fuente: Elaboración Propia.

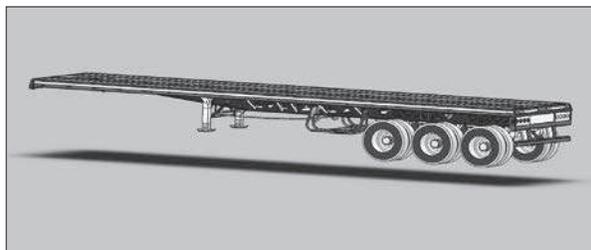


Figura 9. Modelo final con vigas optimizadas.
Elaboración Propia

tre el tracto camión y el King Ping. La otra fuente posible es la asociada a las carreteras y terrenos destapados por los que debe pasar. Siguiendo los valores obtenidos en [13], se hizo un barrido en un rango de 20HZ a 90HZ. Las frecuencias que más pueden afectar son la de 60HZ y luego la de 40 HZ teniendo en cuenta que éstas son bajas que se pueden producir por el paso en un terreno destapado o por el tránsito normal en una carretera. En estas condiciones los esfuerzos inducidos son de 1,97GPa y 697MPa respectivamente y ocurren en la parte superior de la viga cerca al acople. Es de entender que gran parte de la disipación de energía vibracional la asume la suspensión cuyos elementos no fueron considerados para esta simulación y que bien podrían ayudar a disminuir los valores de esfuerzos sometidos. La presentación final del modelo se muestra en la figura 9..

6. CONCLUSIONES

Fue posible llegar a un diseño que mejoró las condiciones de peso y que permite aumentar la capacidad de carga en un semirremolque de tipo plataforma multipropósito. La solución definida luego de los análisis respectivos ahorra masa en aproximadamente un 13% que corresponde a 301,5Kg que pueden utilizarse para aumentar la capacidad de carga del semirremolque.

Dentro del análisis se identificaron las vigas como el elemento fundamental del semirremolque y el que más masa aportaba al conjunto del vehículo. Por lo tanto, los procedimientos de optimización topológica se encaminaron a la reducción de la

masa en las vigas.

El uso del QFD como estrategia para el análisis inicial de la problemática permitió definir claramente los objetivos del diseño óptimo y tener en cuenta los requerimientos que potenciales clientes pueden tener del equipo trabajado. Este aspecto es fundamental ya que el proyecto debe continuar hacia la construcción de un prototipo para realizar mediciones sobre él y así lograr una solución que pueda incorporarse al mercado.

El uso del método SIMP, que fue la otra técnica que se estudió para implementar la solución, es aún de gran utilidad para problemas de vigas convencionales como las que se trabajaron en este proyecto, con la ventaja de ser más eficiente, computacionalmente con respecto a los algoritmos genéticos.

Teniendo en cuenta la magnitud de la aplicación, la simplificación de los modelos fue fundamental para poder llegar a resultados que pudieran validarse y utilizarse. El uso de aproximaciones bidimensionales a partir de asumir el caso crítico de las vigas como únicos elementos estructurales, dada su significancia en el equipo modelado, simplificó los cálculos significativamente, aunque se presume un error con respecto a un modelo tridimensional. Sin embargo, las magnitudes tanto de esfuerzos como de deformaciones en las vigas, en todo el conjunto, tenderían a disminuir más que a aumentar por la rigidez que aportan los demás elementos que conforman el soporte de carga.

La viabilidad económica de las soluciones está dentro del valor que normalmente un cliente pagaría por el semirremolque. El costo de la manufactura es el que fundamentalmente se tuvo en cuenta y para este proyecto no fueron calculados los costos asociados al diseño, por ser una etapa puramente académica de generación de soluciones a problemáticas específicas.

7. FINANCIAMIENTO

El proyecto fue financiado por el Centro de Investi-

gaciones y Desarrollo Científico, CIDC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Proyecto *DISEÑO ÓPTIMO DE SEMIREMOLQUES PARA VEHÍCULOS PESADOS APOYADO EN UNA PLATAFORMA COLABORATIVA*.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Distrital por la infraestructura suministrada y a Talleres Torres por su aporte al desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1]. COLFECAR, “Comportamiento Sectorial Transporte y coyuntura 2010,” 2010.
- [2]. Ministerio de Transporte, “Diagnóstico del transporte 2010 República de Colombia. Ministerio de transporte oficina asesora de planeación Grupo de planificación sectorial 2010.” 2010.
- [3]. Ministerio del Transporte, “Resolución 4100 de diciembre 29 de 2004. Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional.” 2004.
- [4]. P. W. Christensen and A. Klarbring, *An Introduction to Structural Optimization*. Springer, 2008.
- [5]. M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization*, 2nd ed. Springer, 2004.
- [6]. Ioannis Nitsopoulos, Boris Lauber, “Overview on optimization methods,” presented at the 2nd ANSA & μETA International Congress, Halkidiki Greece, 2007.
- [7]. S. Bureerat and T. Kunakote, “Topological design of structures using population-based optimization methods,” *Inverse Problems in Science and Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 589–607, 2006.
- [8]. Z. Luo, L.-P. Chen, J. Yang, and Y.-Q. Zhang, “Multiple stiffness topology optimizations of continuum structures,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 203–214, 2006.
- [9]. X. Huang and M. Xie, Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications. John Wiley & Sons, 2010.
- [10]. J. A. Carnevalli and P. C. Miguel, “Review, analysis and classification of the literature on QFD—Types of research, difficulties and benefits,” *International Journal of Production Economics*, vol. 114, no. 2, pp. 737–754, Aug. 2008.
- [11]. Farzad R., Chien-Ming C. & Kikuchi N, “Design analysis of composite laminate structures for light-weight armored vehicle by homogenization method,” *Elsevier Science-Computer and Structures*, vol. 76.
- [12]. D. Högberg, “Use of finite element method in trailer deck design,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 117, no. 1–2, pp. 238–243, Nov. 2001.
- [13]. Gerardo Franck, Sergio Gennaro, Bruno Lonardi, José Eichborn, Alejandro Bruno, “Análisis Dinámico de un Chasis de Semi-remolque de Servicio Pesado,” *Mecánica Computacional*, vol. Volume XXVIII., no. 7, pp. 503–517.