

Diseño y simulación de un trineo cargador de equipos e insumos en helicóptero

Design and simulation of sled-charger for equipment and supplies in helicopter

Danna Contreras Meza



José Jácome Carrascal



Universidad Francisco de Paula Santander

Orlando Castellanos González



Andrés Moreno Uribe



Universidad Federal de Minas Gerais

OPEN ACCESS

Recibido: 09/02/2022

Aceptado: 18/04/2022

Publicado: 30/06/2022

Correspondencia de autores:

dannalizabethcm@ufps.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Diseñar y modelar un trineo de carga para equipos e insumos en el sector petrolero y gas. **Metodología:** Inicialmente, se definió la geometría del trineo con base a las restricciones establecidas, en la cual se evaluaron la magnitud y el lugar de aplicación de las fuerzas en condiciones de servicio. Posteriormente, mediante el método de Pugsley se halló el factor de seguridad, con el propósito de evitar falla de tipo estática como resultado de la aplicación de cargas. Se generó el modelo geométrico, la discretización y la simulación bajo cargas estimadas empleando el método de elementos finitos, y los recursos computacionales de softwares CAD/CAE. **Resultados:** Finalmente, se representaron los resultados del análisis por medio de trazados de esfuerzo, deformación y factor de seguridad, comparando con el método de Pugsley para así definir la carga que debe transportar la estructura. **Conclusiones:** Se definió 2000Kgf como carga máxima, ya que garantiza la seguridad de uso del trineo.

Palabras clave: Método de elementos finitos, Modelado, Simulación, Trineo, Diseño Estructural.

Abstract

Objective: Design and model a cargo sled for equipment and supplies in the oil and gas sector. **Methodology:** Initially, the geometry of the sled was defined based on the established restrictions, in which the magnitude and place of application of the forces in-service conditions were evaluated. Subsequently, the Pugsley method was used to find the safety factor to avoid static failure as a result of the application of loads. The geometric model, the discretization, and the simulation under estimated loads were generated using the finite element method and the computational resources of CAD/CAE software. **Results:** Finally, the results of the analysis were represented through stress, deformation, and safety factor plots, comparing with Pugsley's method to define the load to be carried by the structure. **Conclusions:** 2000Kgf was defined as the maximum load since it guarantees the safe use of the sled.

Keywords: Finite element method, Modeling, Simulation, Sled, Structural Design.

Introducción

El sector petróleo y gas se ubica entre las industrias de mayor importancia económica y posee relevancia estratégica internacional, debido a su vínculo con el desarrollo tecnológico, la seguridad energética y enormes flujos de capital [1], dado que el petróleo posiblemente sea la sustancia más importante que consume la sociedad. Los combustibles que se derivan del petróleo proporcionan más de la mitad de la oferta total de energía del mundo. Por otra parte, representa una fuente de materia prima en la fabricación, constituyendo el papel primordial en el funcionamiento de la industria moderna. [2]. En consecuencia, se ha incrementado paulatinamente la demanda y la exigencia de innovación en todos sus procesos (extracción, procesamiento del crudo, refinamiento, etc), con el objetivo de poder abastecerla [3].

En relación a la logística del sector petróleo y gas, es necesario disponer en el tiempo oportuno y en buenas condiciones, de los insumos, piezas, herramientas, equipos y maquinarias, en la búsqueda de ventajas competitivas, visando maximizar la rentabilidad presente y futura [4]. Por tanto, es crucial diseñar y modelar estructuras que optimicen los procesos y ofrezcan soluciones al transporte de material y equipos a los frentes de obra. El trineo de carga se presenta como una alternativa, ya que en este tipo de sector el transporte se ve limitado por las condiciones del terreno, por otro lado, ayuda a simplificar y agilizar las actividades de carga y descarga [5].

En el diseño mecánico se hace cada vez más importante el análisis, evaluación y control de grandes conjuntos estructurales, con el fin de proporcionar soluciones aproximadas a la realidad. Para herramientas y equipos en los cuales la cifra de error no está permitida, es primordial involucrar métodos en la validación de diseño, que simulen el comportamiento de sistemas de ensambles y articulaciones; en este sentido, el uso del análisis de elementos finitos es fundamental. [6]. Al mismo tiempo, esta herramienta ofrece numerosas ventajas, tal como la fácil creación de un modelo y la simple utilización del método para desarrollarlo. Además, dentro de las principales virtudes de la Ingeniería asistida por computador (Computer-Aided Engineering - CAE), está la accesibilidad a velocidades computacionales mejoradas que otorgan los softwares comerciales [7]. Igualmente, las simulaciones de elementos finitos son más intuitivas, completas y ayudan ahorrar tiempo y costos [8].

El Análisis de Elementos Finitos son un conjunto de técnicas de resolución numérica que logran una aproximación a problemas complejos de ingeniería y física matemática, como son el análisis estructural, dinámica de fluidos, medicina y biomecánica [9]. Es por ello que, en el área del análisis estructural, se utiliza para simular y predecir una amplia gama de fenómenos, que incluyen la estimación de las propiedades mecánicas de un sistema, iniciación y propagación de grietas, comportamiento interfacial de la matriz de refuerzo, comportamiento visco-elástico y plástico, y capacidades de absorción de energía, en el caso particular de las ciencias mecánicas. [10, 11]. También se utiliza para determinar los efectos de la carga sobre los elementos que conforman las estructuras, evaluando el estado tensional, sin importar el grado de complejidad [12, 13], inclusive para obtener una relación de precisión entre la tolerancia geométrica y el rendimiento de empuje [14].

El método de elementos finitos consiste en dividir la estructura en pequeños elementos de tipo elástico, bien definidos pero finitos. Al servirse de funciones polinomiales, en conjunto con operaciones matriciales, el comportamiento elástico continuo de cada elemento se forma en función del material y las propiedades geométricas del elemento. [6]. A partir del análisis individual de cada uno de estos elementos, se obtiene un modelo computacional integral de la estructura analizada, que permite, determinar su resistencia global y ser sometido a cargas matemáticamente [15], las cuales, se pueden aplicar dentro del elemento, en la superficie o en los nodos del mismo [6].

Con auxilio del método de elementos finitos se logra desarrollar un óptimo análisis estructural en el trineo, ya que esta técnica permite evaluar la viabilidad de la estructura, validar el comportamiento mecánico y determinar la respuesta o estados de tensión producida bajo la acción de la carga que debe transportar. Determinar los estados de tensión es importante para cumplir los criterios de resistencia que plantean las normativas, en vías de garantizar la seguridad estructural [16]. Para esto, se deben considerar las incertidumbres existentes, el diseño se debe realizar para operar a niveles de tensión por debajo de la tensión límite de los materiales y, por consiguiente, se requiere de un factor de seguridad para evitar un fallo estructural. [17]

En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo definir los materiales y el diseño de un trineo de carga para la industria del sector petróleo y gas, considerando el análisis estructural, calculando el factor de seguridad mediante el método de Pugsley y utilizando el método de elementos finitos. Por último, a fin de tener la validación total del sistema y garantizar la seguridad del diseño, se comparó el factor de seguridad obtenido por ambos métodos para determinar la carga que debe transportar el trineo.

Metodología

La metodología propuesta en el presente artículo se basa en las siguientes etapas: En un primer momento, se realizó el diseño y modelamiento del trineo; después, se efectuó el modelamiento de la base del trineo, refuerzos y encerramiento; seguidamente, fueron modelados la lámina alfajor y los puntos de sujeción; posteriormente, se determinó el factor de seguridad por medio de la metodología de Pugsley. Finalmente, fueron ejecutados la simulación del trineo y el análisis estático.

Diseño y modelamiento del trine

El proceso de diseño inicia determinando la necesidad; por lo tanto, para poder comenzar con el proyecto, se definió primero lo que es en sí un trineo y se delimitó su geometría, que incluye dimensiones y perfiles. El trineo es la estructura requerida en este caso, la cual consta generalmente de un par de guías metálicas y otros elementos; estas guías tienen como principal función disminuir el área de contacto y la fricción, sin sacrificar la estabilidad durante su operación. Además de esto, están pensados para terrenos inhóspitos y condiciones hostiles en donde una llanta difícilmente conseguiría locomoción. Es importante que el diseño realizado simule el sistema físico real muy bien, para garantizar de esta forma un desempeño satisfactorio [18]. Así mismo, en un diseño se debe tener en cuenta todos los factores que influyen en su creación, en este caso, la resistencia es una consideración de diseño significativo para determinar la geometría y dimensiones, puesto que el trineo busca transportar carga en la industria [6].

Se seleccionaron los perfiles metálicos, entre estructurales y para aplicación en líneas de conducción, ya que son más accesibles en la región. Con base en la Norma ASTM A 53 (NTC 470) la cual es la "Especificación Normalizada para Tubos de Acero Negro e Inmersos en Caliente, Galvanizados, Soldados y Sin Costura" [19], se definieron los perfiles como líneas de conducción para instalaciones de gas y conducción de fluidos como lo son aceites, agua, gas y aire, además de vapor, en medias y altas presiones [20]. La Tabla 1 que se presenta a continuación, definen las características geométricas de tubos Schedule 40.

Tabla 1. Características Tubo Schedule 40

Diámetro nominal	Diámetro exterior (pulg.)	Espesor de pared (pulg.)	Presión de prueba (psi)
2 "	2.375	0.154	2300
2 1/2 "	2.850	0.203	2500
3 "	3.500	0.216	2500

Fuente: [20]

Estos tubos están fabricados con aceros laminados en caliente consecuente con las normas AISI/SAE 1008, 1010, 1015 y sus propiedades mecánicas, especificadas en la Tabla 2, están en el orden de:

Tabla 2. Propiedades mecánicas Tubo SCH 40

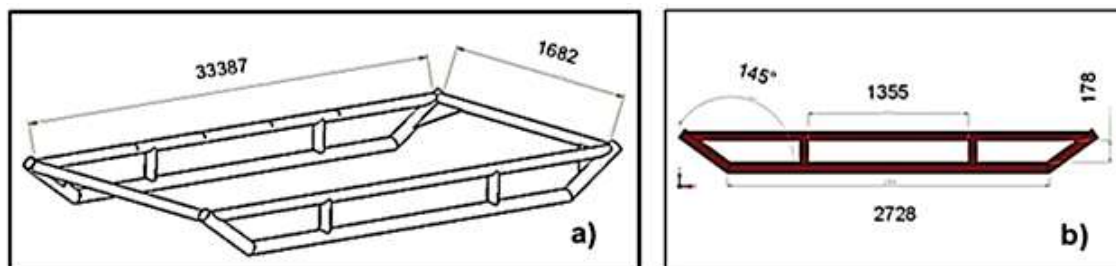
Acero Laminado en Caliente (HR)	
Esfuerzo de Fluencia Mínimo (psi)	33000
Esfuerzo de tensión Mínimo (psi)	48000
Porcentaje de elongación	20%

Fuente: [20]

Modelamiento de la base del trineo, refuerzos y encerramiento

Inicialmente se diseñó la base del trineo, por lo cual se plantean dimensiones de acuerdo a recomendaciones de trabajadores e ingenieros cercanos al proyecto. Se hacen juntas en sección tubular de 2", 2 1/2" y 3" SCH 40. Se usa como herramienta CAD el software SolidWorks® para el modelamiento, como se puede observar en la Figura 1a y Figura 1b

Figura 1. Vistas de la base del trineo. (a) vista isométrica (b) vista lateral. Dimensiones en mm.



Fuente: Elaboración propia

Partiendo de la base ya modelada, se diseñó la configuración geométrica de la estructura de refuerzo, la cual está constituida por perfiles de sección transversal en forma de ángulo recto de 3" X 3/8", en acero laminado en caliente (HR) de alas iguales [21]. La norma bajo la que se fabricaron estos perfiles fue la NTC 1920 – 1985 (Aceros de calidad estructural de alta resistencia baja aleación al niobio – vanadio); ASTM A-36; ASTM 572; ASTM 529. Posteriormente, se usaron seis perfiles de ángulo de 3" X 3/8" cada uno de 1760 mm y se modelan sobre la base del trineo.

Así mismo se escogió un perfil en ángulo para diseñar el encerramiento, junto con tubos de 2" SCH 40 ya que ésta sección transversal ofrece mayor rigidez, confiriendo mayor estabilidad al conjunto. El perfil de sección transversal en ángulo recto es de 2" X 3/16" y se fundamenta bajo las mismas normas del perfil anterior. A continuación, en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se pueden observar las características de los perfiles angulares.

Tabla 3. Propiedades mecánicas para perfiles en Angulo

NTC 1985 - Grado 50	
Propiedades mecánicas	KSI / Kgf/mm2 / Mpa
Resistencia a la tracción Fu (mínima)	65 - 45.9 - 450
Resistencia a la tracción Fy (mínima)	50 - 35.2 - 345
Alargamiento % (200 mm)	18

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Dimensiones nominales perfiles en ángulo

Ala (pulgadas)	Peso Aprox. (Kg/m)	Norma NTC
2" X 3/16"	3.63	1985
3" X 3/8"	10.7	1985

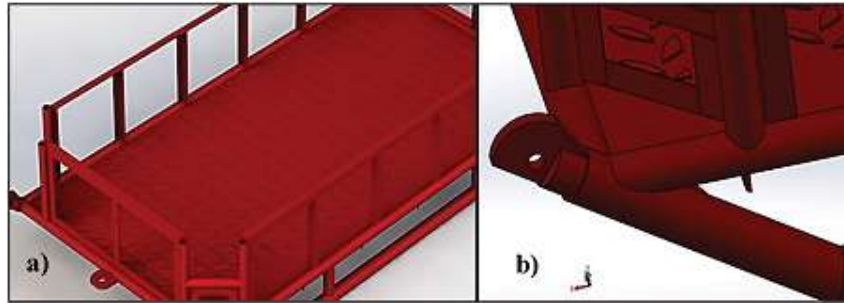
Fuente: Elaboración propia

Modelamiento de la lámina alfajor y los puntos de sujeción

Para lograr una carga distribuida en el trineo, se hace necesaria la implementación de una lámina de Alfajor (ver Figura 2a). Por otra parte, presenta ciertas ventajas muy importantes como su uso recomendado en aplicaciones antideslizantes y para uso en zonas industriales de riesgo elevado [22]. Por lo tanto, se optó por aplicar una placa de 3 mm de espesor la cual está fabricada con material ASTM A36, el cual es común en aplicaciones de tipo estructural y de resistencia media. Estas láminas se encuentran comercialmente de 1000 mm X 3000 mm con un peso promedio de 77 Kg [22].

Los puntos de sujeción son de vital importancia y fundamentales en el proceso de diseño, pues representan las conexiones entre el trineo y el helicóptero, por tanto, se debe considerar cuidadosamente ciertas premisas como las concentraciones de esfuerzos y puntos críticos en la simulación. En resumen, son platinas ovaladas de 1" de espesor y un orificio de 1 1/8" ver Figura 2b. Las cuales son diseñadas en acero ASTM A 36, el cual tiene por resistencia a la tensión 470 Mpa y una resistencia a la fluencia de 390 Mpa

Figura 2. Trineo modelado. (a) Lámina de alfajor (b) puntos de sujeción



Fuente: Elaboración propia

Determinación del factor de seguridad por medio de la metodología de Pugsley

El factor de seguridad se utiliza para determinar las incertidumbres relacionadas a las tolerancias de fabricación, las variaciones en las cargas, los cambios en las propiedades de los materiales y los otros efectos desconocidos que existen cuando los dispositivos se encuentran en funcionamiento. [23]. Por esta razón, con el fin de garantizar un óptimo desempeño de los elementos de la estructura (tubos, ángulos, puntos de sujeción, etc.); se determinó un factor de seguridad con la intención de compensar cualquier tipo de incertidumbre que se pueda presentar en las cargas [24].

El método de Pugsley, permitió realizar la evaluación del coeficiente admisible de seguridad, el cual es producto de los factores que comprometen aspectos determinantes en el análisis y que definen el comportamiento de la ecuación (1). El factor de seguridad n_{sx} , comprende aspectos de control y calidad, mientras que el factor n_{sy} incluye aspectos de seguridad y economía. [25],

$$n_s = n_{sx} * n_{sy} \quad (1)$$

En la Figura 4 se proporcionan los valores de n_{sx} para varias condiciones A, B y C, donde:

A: calidad de los materiales.

B: control sobre la carga aplicada.

C: exactitud del análisis de esfuerzo, información experimental o experiencia con dispositivos similares.

En la Figura 3 se muestran valores de n_{sy} para varias condiciones D y E. Factor de seguridad que involucra las características D y E:

D: peligro para el personal.

E: impacto económico

Figura 3. Tabla condicionante del valor nsy

Característica ^a	D=			
	ns	s	ms	
E= {	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	ms	1.2	1.4	1.6

^ams= muy serio, s=serio y ns=no serio.
D= peligro para el personal.
E=impacto económico

Fuente: [24]

Se consideraron las siguientes estimaciones para cada una de las características:

A= r, Algunos materiales no aplican para el tipo de diseño.

B= b, Es de vital importancia, ya que la carga del trineo está en función de la capacidad de carga del Helicóptero.

C= b, Validación del diseño por medio del MEF.

D= ms, Estructura para manejo en seguridad.

Figura 4. Tabla condicionante del valor nsx

Característica ^a	B=				
	mb	b	r	p	
A= mb C= {	mb	1.1	1.3	1.5	1.7
	b	1.2	1.45	1.7	1.95
	r	1.3	1.6	1.9	2.2
	p	1.4	1.75	2.1	2.45
A= b C= {	mb	1.3	1.55	1.8	2.05
	b	1.45	1.75	2.05	2.35
	r	1.6	1.95	2.3	2.65
	p	1.75	2.15	2.55	2.95
A= r C= {	mb	1.5	1.8	2.1	2.4
	b	1.7	2.05	2.4	2.75
	r	1.9	2.3	2.7	3.1
	p	2.1	2.55	3.0	3.45
A= p C= {	mb	1.7	2.15	2.4	2.75
	b	1.95	2.35	2.75	3.15
	r	2.2	2.65	3.1	3.55
	p	2.45	2.95	3.45	3.95

^amb=muy bien, b= bien, r=regular y p= pobre.
A= calidad de los materiales, mano obra, mantenimiento e inspección.
B= control sobre la carga aplicada a la parte.
C= exactitud del análisis de esfuerzos, de la información experimental o de la experiencia con partes similares.

Fuente: [24]

E= ms, De gran importancia el impacto que logre la máquina por razones de inversión.

De los cuadros 1 y 2 el factor de seguridad es:

$$n_s = 2.05 * 1.6$$

$$n_s = 3.3$$

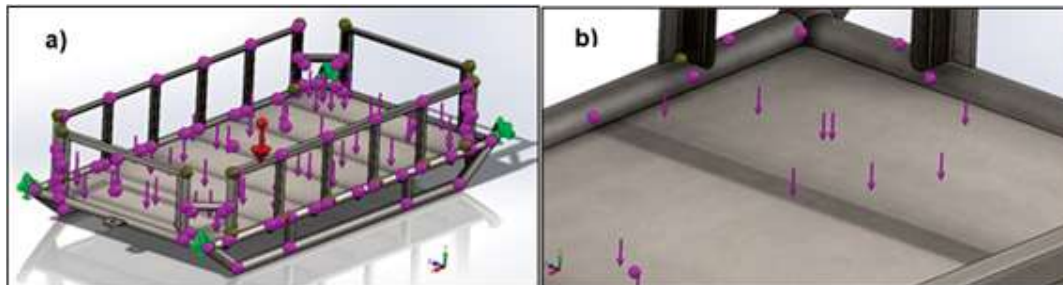
Simulación del trineo: análisis estático

El análisis estructural moderno se caracteriza por encontrarse basado ampliamente en el análisis de elementos finitos; De esta manera, una vez se definió el modelamiento y geometría del trineo, se realizó un análisis a carga estática por este método, mediante la aplicación del software SolidWorks Simulation®, ya que en éste se puede evidenciar el comportamiento de varios elementos y su conjugación, permitiendo conocer la conducta del modelo a partir de cargas en entornos controlados. Así mismo, la simulación permite determinar el factor de seguridad. Cuando se realiza un análisis estático se deben suponer tres condiciones importantes: un primer punto aborda el análisis estático como eso, un ensayo a condiciones estáticas y en segundo lugar se enmarca dentro de un ensayo lineal, donde las deformaciones son directamente proporcionales a las cargas que se apliquen [26].

En este proyecto se determinaron los desplazamientos, una incógnita de gran importancia que representa el dato con mayor precisión, puesto que los demás elementos dependen en gran medida de este gradiente. También, se establecieron las tensiones de Von Mises, las cuales son un criterio de falla que se fundamenta en la energía de deformación, la cual posee unidades de esfuerzo [27]. El criterio de Von Mises es idóneo para materiales dúctiles, y en este, la falla ocurre cuando la energía de deformación asociada a procesos mecánicos, logra el valor de la energía de deformación límite en el ensayo uniaxial. [17]. Por otra parte, los cambios mínimos en la característica geométrica local en una pieza, tienen la capacidad de cambiar las magnitudes de tensión en su límite de manera significativa [27]. Finalmente, se obtuvo el factor de seguridad para evitar fallos estructurales, analizando globalmente el diseño. Todos estos cálculos fueron realizados bajo cargas de 2000 Kgf y 4000 Kgf [28].

Para este caso y como se ve en la Figura 5a y Figura 5b, el modelo tiene aplicación de fuerzas en la zona rectangular gris, la cual es una representación más sencilla y simboliza la lámina de alfajor. Se evidencia a manera de indicadores de color rosa y supone una distribución homogénea de carga para cada caso en específico (2000 y 4000 Kgf). La flecha roja en el centro del modelo representa la gravedad (con un valor de 9,81 m/s²).

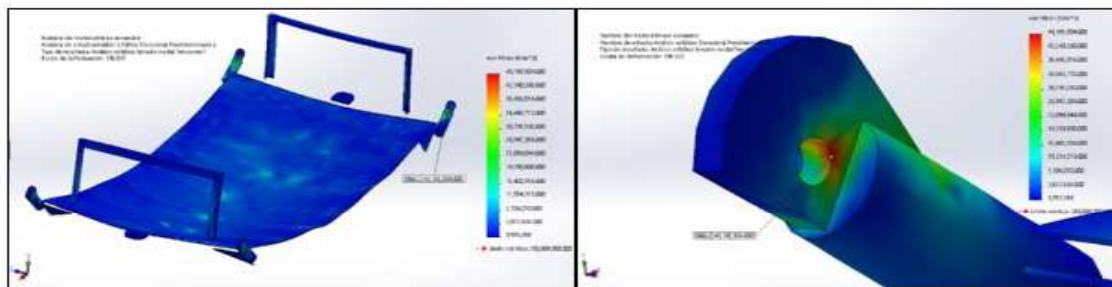
Figura 5. Distribución de la carga en la superficie de la lámina alfajor. (a) Vista trimétrica del trineo (b) Detalle de la distribución de cargas



Fuente: Elaboración propia

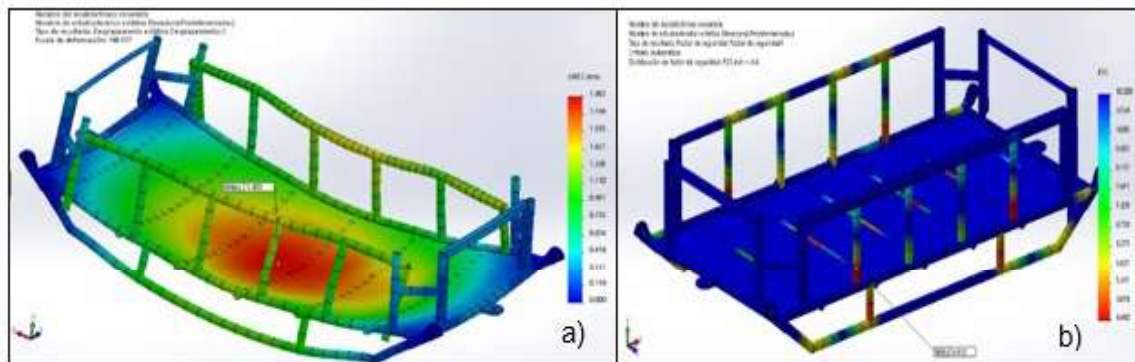
Análisis estático para 2000 Kgf

Figura 6 Tensiones de Von-mises para 2000 Kgf



Fuente: Elaboración propia

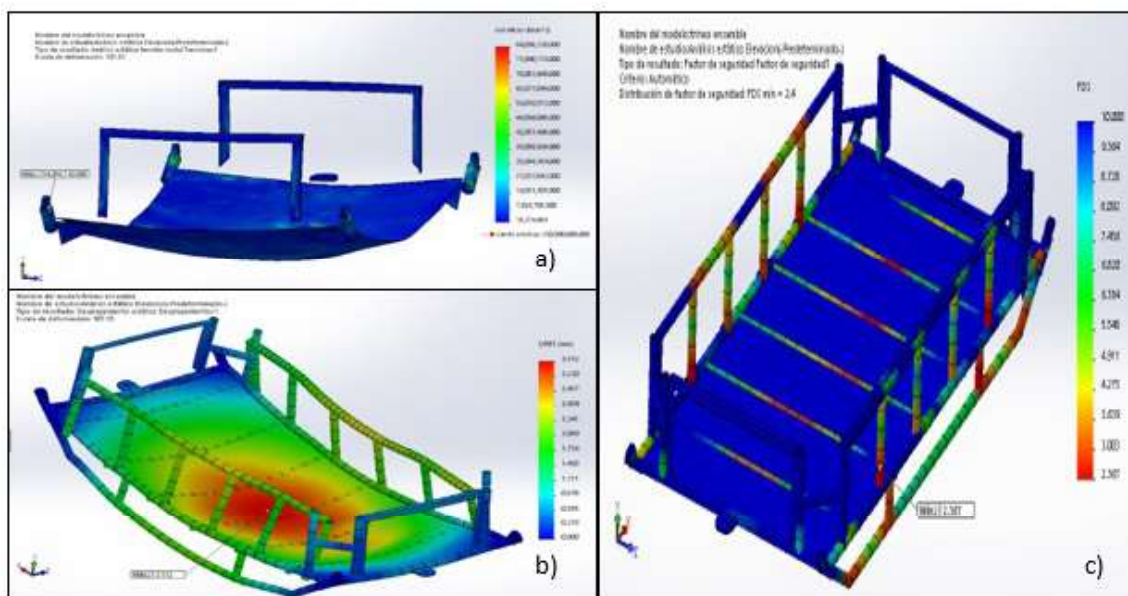
Figura 7. Análisis estático para 2000 Kgf. (a) Desplazamiento de trineo. (b) Factor de seguridad



Fuente: Elaboración propia

Análisis estático para 4000 Kgf

Figura 8. Análisis estático para 4000 Kgf. (a) Tensiones de Von-mises (b) Desplazamiento de trineo. (c) Factor de seguridad



Fuente: Elaboración propia

Resultados

Figura 9. Fotografías del trineo construido a partir del diseño realizado



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 9 se presenta el trineo construido, en situación real de carga de equipamientos y suministros. Este diseño es utilizado actualmente en la industria de petróleo y gas y ha demostrado ser una estructura exitosa, ya que cumple con las tareas de carga, debido a la geometría y materiales seleccionados en el desarrollo de este proyecto.

Tabla 5. Valor máximo de las tensiones de Von Mises para las cargas estimadas

Carga	Mayor valor de las Tensiones de Von Mises	Límite Elástico
2000 Kgf	46,188,504.000 (N/m ²)	250,000,000.000 (N/m ²)
4000 Kgf	84,096,720.000 (N/m ²)	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Desplazamiento máximo de trineo para las cargas estimadas

Desplazamiento máximo del trineo	
2000 Kgf	1.9 mm
4000 Kgf	3.5 mm

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Factor de seguridad obtenidas por el método de Pugsley y método de elementos finitos

Factor de seguridad		
Método de Pugsley	Método de elementos finitos	
	2000 Kgf	4000 Kgf
3.3	4.4	2.4

Fuente: Elaboración propia

En la investigación se utilizaron dos parámetros de carga con el fin de evaluar las tensiones de Von Mises, el desplazamiento y el factor de seguridad. Para la carga de 2000 Kgf, se observó que la tensión que se produjo fue menor que el valor del límite elástico, como se evidencia en la Tabla 5 y Figura 6. Es conveniente indicar que este dato es el resultado de la tensión en distintos elementos del trineo y su cotejo con el límite elástico del material, lo cual demuestra que no se originan deformaciones permanentes en la estructura. Por otro lado, la Tabla 6 y Figura 7a representa el máximo desplazamiento que se generó en el trineo; así pues, el desplazamiento del conjunto en la zona más crítica está en el orden de los 1,9 mm, por ende, se consideró despreciable. Finalmente, en relación con el factor de seguridad evaluado sobre el criterio de máxima tensión de Von-mises o la energía de deformación máxima tuvo un valor de 4,4 como se observa en la Figura 7b; esto se traduce en que la carga estática aplicada está sobre el valor de referencia de Pugsley, que se observa en la Tabla 7 [29].

Las tensiones para una carga de 2000 Kgf representaron 1/5 del límite elástico del material, mientras que para una carga de 4000 Kgf constituyó 1/3 del valor del límite elástico de referencia, como se muestra en la Figura 8a. Además, para esta última carga el desplazamiento general del conjunto fue de 3,5 mm, como se observa en la Figura 8b, y el factor de seguridad tuvo un resultado de 2,367 como se evidencia en la Figura 8c. A pesar de que el desplazamiento no se considera significativo debido a su poca magnitud, esta carga no se seleccionó, ya que el factor de seguridad fue menor que el valor obtenido de la metodología de Pugsley, por consiguiente, la carga máxima que debe soportar el trineo es la de 2000 Kfg, puesto que tanto el método de Pugsley y el método de elementos finitos apuntan que esta es la óptima, debido a que garantiza la seguridad estructural de manera integral, teniendo en cuenta aspectos de diseño mecánicos, control, seguridad, economía y calidad.

Conclusiones

En este trabajo se diseñó, modeló y simuló un trineo para el transporte de insumos y equipos con el auxilio del software SolidWorks®. En referencia a lo anteriormente expuesto se concluye que el diseño del trineo satisface las necesidades de la industria de petróleo y gas, puesto que el sistema simulado se asemeja a la realidad, ya que el modelo matemático reunió características muy específicas de las condiciones reales de los fenómenos que se presentan en este proceso estructural. Por otra parte, el trineo contiene las características necesarias para optimizar el transporte de insumos y equipos, debido a que la estructura funciona sin presentar inconvenientes, como fallos estructurales, cuando se traslada por diversos terrenos o cuando es transportado por el helicóptero. Además, su diseño permite que la carga y descarga sea más fácil, disminuyendo de esta forma los tiempos relacionados al transporte.

El resultado mostrado por la metodología de Pugsley representa el producto de un análisis del contexto general de la estructura, dado a que se tuvieron en cuenta factores de control, económicos, de calidad y seguridad. El factor de seguridad obtenido utilizando el método de Pugsley como se pudo observar tuvo un valor de 3,3. Este dato se tomó como referencia para compararlo con el calculado mediante el método de elementos finitos y de esta manera definir la carga máxima que debe trasladar el trineo.

En la evaluación realizada a la estructura mediante el método de elementos finitos para las dos cargas estimadas, se observó que para la carga de 2000 Kgf, el factor de seguridad tuvo un valor de 4,4, mientras que para la carga de 4000 Kgf este factor fue de 2,4, lo que demostró que es favorable que el trineo soporte máximo una carga de 2000 Kgf, ya que presentó un factor de seguridad mayor que el hallado por medio del método de Pugsley, además, las tensiones de Von Mises para esta carga fueron inferiores al límite elástico

y el desplazamiento de 1,9 mm generado es despreciable. Por estos motivos, esta fue la carga máxima seleccionada para que el trineo transporte los insumos y equipos en esta industria de petróleo y gas.

Referencias bibliográficas

1. P. H. M. Gomes, "Petróleo, Gás e Políticas Públicas no Brasil," *Revista Brasileira de Políticas Públicas e Internacionais*, vol. 5, nº 3, pp. 157-181, 2020. DOI:<https://doi.org/10.22478/ufpb.2525-5584.2020v5n3.54073>
2. W. F. P. López y E. García-Calvo, "El agua en el sector de petróleo y petroquímica: usos y tratamientos," Tesis Maestría, Univ. Alcalá, Univ. Rey Juan Carlos, Dept. Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, Alcalá de Henares, 2019
3. M.-M. Erich, R.-A. F. Daniel y A.-M. Leonardo, "Emulsificación de petróleo crudo para su transporte por oleoductos," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 17, nº 3, pp. 395-403, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.009>
4. Y. Leal, "Gestión logística de materiales en la industria petrolera venezolana," *Revista de Investigación en Ciencias de la Administración*, vol. 2, nº 5, pp. 16 - 34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.33996/revistaenfoques.v2i5.27>
5. INOTEC, representaciones técnicas, "Trineos pasajeros/ carga," Santiago de Chile. (s. f.) [Internet], Disponible en: <https://www.inotec.cl/trineo-pasajeros-carga.php>
6. R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de SHIGLEY*, Octava ed., Mc Graw-Hill, 2008.
7. V. Prantil, C. Papadopoulos y P. Gessler, *Mentir por aproximación: la verdad sobre el análisis de elementos finitos. Conferencias de síntesis sobre ingeniería*, Morgan y Claypool, 2013, pp. 1-112. DOI: <https://doi.org/10.2200/S00503ED1V01Y201305ENG023>
8. Y. Song, L. Yang y H. Jiang, "Finite element analysis on deformation characteristics of metal roof panels under negative wind load," *2015 Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, pp. 489- 491, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2015.124>
9. R. C. Clavecillas, G. M. Bathan, R. S. Maglantay, J. P. Rogelio, F. E. T. Munsayac y R. G. Baldovino, "Design and Finite Element Analysis of Customized Local Road Vehicles (CLRV): The Case for the Tricycle and the Philippine Jeepney," *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1758-1761, October 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650107>
10. Q. Guo, W. Yao, W. Li y N. Gupta, "Constitutive models for the structural analysis of composite materials for the finite element analysis: A particular review of recent practices," *Composite Structures*, pp. 1-31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113267>
11. S. Bahl y A. K. Bagha, "Finite element modeling and simulation of the fiber-matrix interface in fiber reinforced metal matrix composites," *Materials Today*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.160>
12. A. González-Becerra y R. Estrada-Cingualbres, "Análisis dinámico por elementos finitos del conjunto soporte-captador de alta frecuencia de un tren subterráneo," *Ingeniería Mecánica*, vol. 18, nº 1, pp. 23-30, 2015. Disponible en: <https://ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/505>

13. S. Okpokparoro y S. Sriramula, "Uncertainty modeling in reliability analysis of floating wind turbine support structures," *Renewable Energy*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.068>
14. Z. Yao, J. Zhao, Member, IEEE, J. Song, F. Dong, Z. He y K. Zong, "Research on Selection Criterion of Design Tolerance for Air-core Permanent Magnet Synchronous Linear Motor," *Transactions on Industrial Electronics*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2979574>
15. R. Larrainzar-Garijo, J. Caeiro, M. Marco, E. Giner y M. Miguélez, "Validación experimental de un modelo de análisis de elementos finitos en fractura de cadera y su aplicabilidad clínica," *Revista Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.recot.2018.05.006>
16. M. Cervera Ruiz y E. Blanco Díaz, *Mecánica de estructuras Libro 2, Métodos de análisis*, EDICIONS UPC, 2009, pp. 1-341.
17. M. Cervera Ruiz y E. Blanco Diaz, *Mecánica de estructuras Libro 1 Resistencia de materiales*, Edicions UPC, 2009.
18. R. G. Budynas, J. K. Nisbett y J. E. M. Murrieta, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, novena ed., M. Interamericana, Ed., México DF, 2012, pp. 1039 - 1068.
19. ASTM, Norma ASTM A 53 (NTC 470) la cual es la "Especificación Normalizada para Tubos de Acero Negro e Inmersos en Caliente, Galvanizados, Soldados y Sin Costura", 2015. Disponible en: <http://www.astm.org/Standards/A53A53M-SP.htm>
20. COLMENA- Consorcio Metalúrgico Nacional, "Linea conducción: Instalaciones de gas y conducción de fluidos ASTM A36 (NTC-3470) ERW," 2015. Disponible en: <http://tuboscolmena.com/colmena/wp-content/uploads/2015/02/ConduccionGas.pdf>
21. Gerdau Diaco, "Portafolio de productos"(s.f).[Internet]. Disponible en: <http://www.gerdau.com.co/Portals/0/Brochure%20Construccion.pdf>
22. La campana., "Lámina alfajor," [Internet]. 2015 Disponible en: <http://lacampana.co/uploads/10fef63427be4f52e7e0f3fbb87bf149.pdf>
23. J. E. Shigley y C. R. Mischke, *Standard Handbook of Machine Design*, Segunda ed., McGraw-Hill, 1996.
24. H. Bernard, B. Jacobson y S. Steven, *Elementos de Máquinas*, Mc Grawu Hill, 2000.
25. J. M. S. Luna, "Diseño sustentable de una impresora 3d para polvos abs reciclados," Tesis maestría, Sahagún, CIATEQ, Dept. Manufacctura Avanzada, 2015.
26. S. Gómez, SolidWorks® Simulation, RA-MA.
27. J. E. Akin, *Finite Element Analysis Concepts: Via SolidWorks Simulation*, Houston, Texas: World Scientific Publishing Company, 2010.
28. E.-J. Oh, J.-H. Lee, J.-E. Kim y K. Park, "Diseño liviano de un marco de trineo para hockey sobre hielo con diseño para fabricación aditiva," *Revista de la Sociedad Coreana de Ingeniería de Precisión*, vol. 37, nº 6, pp. 407 - 414, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7736 / JKSP.020.039>
29. C. J. Obando Gamboa, "Influencia del agua en el desempeño de los pavimentos: lluvia ácida", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 5, n.º 2, pp. 190-206, 2017. DOI:<https://doi.org/10.17081/invinno.5.2.2761>