



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Estudio de vida útil de un harnero vibratorio mediante método de elementos finitos

POR

Gustavo Adán Toro Jarpa

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Cristian Alexis Canales Cárdenas

Agosto 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Gustavo Adán Toro Jarpa

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

A la empresa patrocinante de este trabajo, por haber brindado la confianza y la oportunidad de formar parte de su equipo, además agradecer el compromiso demostrado en el desarrollo de la actividad.

Al profesor patrocinante, por su disposición y atención a las dudas, inquietudes y consultas que se fueron presentando en el trayecto de la actividad.

Esta memoria está dedicada...

... a los profesores y casas de estudio que influyeron en la formación y desarrollo de habilidades y competencias que permitieran llegar a estas alturas. A los amigos, la familia y a mi madre.

Resumen

Dentro de los componentes más importantes que se encuentran presentes en la línea de producción en la minería del cobre, se pueden destacar a los harneros vibratorios, junto con todos los componentes que brindan el movimiento necesario para realizar la vibración característica de este tipo de equipos. Dada la importancia del papel que juegan los harneros vibratorios y su sistema motriz, es que se vuelve relevante tener pleno conocimiento del estado de funcionamiento de estos equipos, sobre todo del sistema motriz, ya que este se diseña según la disposición espacial que se tenga en la zona de donde se piensa instalar el harnero.

El principal objetivo de este trabajo es realizar un estudio basado en el análisis de elementos finitos de la estructura del sistema motriz que provoca el movimiento vibratorio del harnero. Para el análisis de elementos finitos, se realiza una simulación con elementos de placa de la estructura del sistema motriz, además de poder conocer el régimen de funcionamiento de este sistema a través de análisis modales y estáticos, poniendo especial énfasis en las condiciones de borde y las uniones apernadas.

Los objetivos específicos: determinar fallas de diseño y montaje de las bases motrices que puedan influir en un funcionamiento inadecuado; proponer mejoras a las bases motrices, tales como modificaciones o plantear rediseños basados en simulaciones que permitan mejorar el funcionamiento de estas estructuras.

Se realiza un modelado geométrico de la estructura del sistema motriz, y mediante el software FEMAP se hace la simulación mediante elementos finitos a través de un modelo con elementos de placa de geometría rectangular para simular la estructura y con elementos rígidos para simular el resto de los componentes de sistema motriz tales como poleas, motor y eje. Los pernos de unión se representan a través de elementos de viga. Se plantean análisis modales y análisis estáticos con distintos tipos de configuraciones de precarga de pernos.

Los resultados del análisis modal muestran que la estructura se encuentra funcionando en estado de resonancia. Por otro lado, los análisis estáticos muestran que los pernos de unión presentan una gran diferencia en la carga que estos soportan, lo que indica que para el caso de la soltura de pernos se puede presentar un esfuerzo demasiado alto para aquellas uniones apernadas que no se suelten de la misma forma.

Se propone aumentar la rigidez del sistema con el objetivo de alejar la frecuencia natural del sistema motriz de la zona resonante. Para lograr esto se plantea aumentar la cantidad de pernos de unión entre las estructuras que conforman el sistema motriz, además de posicionar placas en la zona del motor. Estas modificaciones se comprueban a partir de simulaciones bajo la misma configuración con la que se corrobora el estado de funcionamiento. Basado en estas simulaciones se comprueba que efectivamente las modificaciones si generan un aumento de rigidez en el sistema motriz y permite que la frecuencia natural no esté cercana a zonas que pudieran provocar resonancia, tomando en cuenta la relevancia de la precarga que deben tener los pernos.

Palabras clave: harneros vibratorios, rigidez, resonancia, precarga, pernos.

Abstract

Among the most important components present in the production line in copper mining, vibrating screens can be highlighted, along with all the components that provide the necessary movement to generate the characteristic vibration of this type of equipment. Given the importance of the role played by the Vibrating Screen and its driving system, it becomes relevant to have a thorough understanding of the operating condition of this equipment, especially the driving system, as it is designed based on the spatial arrangement in the area where the screen is planned to be installed.

The main objective of this work is to conduct a study based on finite element analysis of the driving system that generates the vibratory motion of the Vibrating Screen. For the finite element analysis, a simulation is carried out using plate elements of the structure of the driving system. This allows us to understand the operating regime of this system through modal and static analyses, with special emphasis on boundary conditions and bolted connections.

The specific objectives are mainly based on determining design and assembly flaws of the motor bases that may influence improper operation, proposing improvements to the motor bases, such as modifications or suggesting redesigns based on simulations that allow for enhancing the performance of these structures.

A geometric modelling of the powertrain system structure is performed, and the FEMAP software is used to simulate it using finite element analysis. A model with rectangular plate elements is used to simulate the structure, while rigid elements are used to simulate the remaining powertrain components such as pulleys, motor, and shaft. The connecting bolts are represented through beam elements. Modal analysis and static analysis are conducted with various configurations of bolt preload.

The modal analysis results indicate that the structure is operating in a resonant state. On the other hand, the static analyses reveal a significant variation in the load supported by the connecting bolts. This suggests that in the case of bolt loosening, excessively high stress may occur for those bolted joints that do not loosen in the same manner.

It is proposed to increase the stiffness of the system to move the natural frequency of the powertrain system away from the resonant zone. To achieve this, the number of connecting bolts between the structures that make up the powertrain system is increased, and plates are positioned in the motor area. These modifications are verified through simulations using the same configuration as the one used to confirm the operating state. Based on these simulations, it is confirmed that the modifications indeed increase the stiffness of the powertrain system and prevent the natural frequency from being close to resonant zones, considering the importance of the preload that the bolts must have.

Keywords: vibrating screen, stiffness, resonance, preload, bolts.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vii
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.1.1 Ubicación y línea de producción	1
1.1.2 Sistema motriz del harnero vibratorio	2
1.2 Importancia del harnero vibratorio en la industria minera	3
1.3 Funcionamiento del harnero vibratorio	3
1.4 Presentación del problema.....	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo principal	5
1.5.2 Objetivos específicos.....	5
1.6 Hipótesis	5
1.7 Metodología.....	6
2 CAPÍTULO 2: Marco teórico	7
2.1 Modelado a partir del FEM	7
2.2 Análisis de condiciones vibratorias	9
3 CAPÍTULO 3: Modelado del sistema motriz	11
3.1 Objetivos del modelado	12
3.2 Condiciones de borde sobre la construcción del modelo	12
3.2.1 Consideraciones para el análisis modal	13
3.2.2 Condiciones de borde del análisis estático	13
3.3 Construcción del modelo	15
3.3.1 Análisis modal sin modelación de pernos	16
3.3.2 Modelación de pernos.....	16
3.3.3 Análisis modal con modelación de pernos	18
3.3.4 Análisis estático.....	18
3.4 Funcionamiento y comportamiento de los sistemas	18
3.4.1 Análisis modal sin modelación de pernos	19
3.4.2 Análisis modal con modelación de pernos	20

3.4.3 Análisis estático sin precarga de pernos	20
3.4.4 Análisis estático con precarga al 70%.	23
3.4.5 Análisis estático con soldadura de tres pernos	25
3.4.6 Análisis estático con soldadura de todos los pernos	26
3.5 Conclusión de funcionamiento del sistema	28
4 CAPÍTULO 4: Planteamiento de solución del problema.....	29
4.1 Consideraciones para realizar modificaciones	29
4.2 Modificaciones estructurales del sistema motriz.....	31
4.2.1 Aumento en el número de pernos	31
4.2.2 Ubicación y geometría de placas de refuerzo	31
5 CAPÍTULO 5: Resultados	32
5.1 Resultados de modificaciones sistema motriz 145-SN-009-010.....	32
5.1.1 Resultados análisis modal.....	32
5.1.2 Resultados análisis estáticos	33
6 CAPÍTULO 6: Conclusión.....	37
Bibliografía.....	38
ANEXOS.....	40

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Propiedades de los elementos del sistema matriz	13
Tabla 3.2: Resultados análisis modal sin modelación de pernos	19
Tabla 3.3: Resultados análisis modal con modelación de pernos	20
Tabla 5.1: Resultados del análisis modal para las modificaciones	32

Lista de Figuras

Figura 1.1: Ubicación DGM. Fuente:[6].....	1
Figura 1.2: Imagen de harnero. Fuente:[5].....	2
Figura 1.3: Fotografía sistemas motrices. Fuente: Elaboración propia.....	2
Figura 1.4: Excitadores harneros. Fuente:[5].....	3
Figura 1.5: Posibles movimientos de partículas en proceso de harneado. Fuente: [5]	4
Figura 1.6: Malla de goma. Fuente: [5].....	4
Figura 2.1: Grados de libertad elemento tridimensional. Fuente:[7]	8
Figura 2.2: Cinco grados de libertad elementos de placa. Fuente:[7]	8
Figura 2.3: Seis grados de libertad elementos de placa. Fuente:[7].....	8
Figura 3.1: Fotografías sistemas motrices: (a) 145-SN-005-006, (b) 145-SN-009-010. Fuente: Elaboración propia	11
Figura 3.2: Modelo geométrico sistema motriz 145-SN-009-010. Fuente: Elaboración propia	12
Figura 3.3: Fuerzas presentes en el sistema de poleas. Fuente: Elaboración propia	14
Figura 3.4: Mallado de las estructuras que conforman el sistema motriz. Fuente: Elaboración propia	15
Figura 3.5: Configuración de contacto para unión rígida. Fuente: Elaboración propia	16
Figura 3.6: Visualización de espesor de elementos. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 3.7: Representación de pernos mediante vigas. Fuente: Elaboración propia	17
Figura 3.8: Posición y sentido de torque del motor. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 3.9: Esfuerzos en pernos sin precarga. Fuente: Elaboración propia.	21
Figura 3.10: Deformada del sistema motriz. Fuente: Elaboración propia	21
Figura 3.11: Esfuerzos de tracción en el sistema. Fuente: Elaboración propia	22
Figura 3.12: Zonas de concentración del esfuerzo. Fuente: Elaboración propia	22
Figura 3.13: Esfuerzos de compresión de sistema motriz. Fuente: Elaboración propia	23
Figura 3.14: Tensor de esfuerzos en la subbase. Fuente: Elaboración propia	23
Figura 3.15: Esfuerzos de tracción en pernos pretensados. Fuente: Elaboración propia	24
Figura 3.16: Esfuerzos de tracción en base. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 3.17: Modificación de precargas de tres pernos. Fuente: Elaboración propia	25
Figura 3.18: Esfuerzos en los pernos según modificación de precarga en tres de estos. Fuente: Elaboración propia	26
Figura 3.19: Esfuerzo de tracción en base y concentración de esfuerzo para soldadura de tres pernos. Fuente: Elaboración propia	26
Figura 3.20: Modificación de precarga de todos los pernos. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 3.21: Esfuerzos en pernos con soldadura de todos estos. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 3.22: Esfuerzos de tracción en base con soldadura de todos los pernos. Fuente: Elaboración propia	28
Figura 4.1: Nodos agregados a los nodos spider. Fuente: Elaboración propia	29
Figura 4.2: Vibración según primera frecuencia natural. Fuente: Elaboración propia	30
Figura 4.3: Disposición de agujeros según la modificación. Fuente: Elaboración propia	31

Figura 4.4: Posición de placas de refuerzo. Fuente: Elaboración propia	31
Figura 5.1: Gráfica con frecuencias de operación y frecuencias naturales. Figura: Elaboración propia	33
Figura 5.2: Esfuerzos de tracción presentes en los pernos de la estructura modificada. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 5.3: Esfuerzos de tracción de la estructura modificada. Fuente: Elaboración propia	35
Figura 5.4: Tensor de esfuerzos en zona de anclaje del eje flotante. Fuente: Elaboración propia	35

Glosario

DGM	:	División Gabriel Mistral
FEM	:	Método de Elementos Finitos

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

El harnero vibratorio es un equipo crítico en la minería de alto impacto productivo. Sus fallas conllevan elevados costos tanto de reparación como de producción. Es por esto por lo que es importante conocer y tener en cuenta las causas que pudieran provocar una falla catastrófica, además de tener conocimiento del ciclo de vida de estos equipos. En base a lo expuesto anteriormente, se define que es requerido conocer la vida útil de los harneros vibratorios mediante el método de elementos finitos, así como también identificar aquellos puntos críticos propensos a presentar fatiga.

Dentro del conjunto que conforma todo el proceso de harneado, también se están presentes los sistemas motrices, los cuales brindan el movimiento para la excitación característica de los harneros vibratorios. Existen diversas formas de montar este conjunto, tomando en cuenta que no siempre se tiene una disposición espacial idónea para posicionar los componentes de la mejor manera. Es por esto por lo que muchas veces es necesario diseñar y construir estructuras a la medida, que soporten este sistema motriz, con el fin de que todo el conjunto de componentes no presente condiciones de funcionamiento anómalas, según los requerimientos necesarios del harnero.

1.1.1 Ubicación y línea de producción

La división Gabriela Mistral de Codelco (DGM) se encuentra ubicada en la región de Antofagasta, comuna de Sierra Gorda, a 120 kilómetros al suroeste de Calama y a una altura de 2660 metros sobre el nivel del mar. En la Figura 1.1 se puede observar en el mapa la ubicación de la división Gabriela Mistral. Este yacimiento, el cual entró en producción en el año 2008, contiene aproximadamente 620 millones de toneladas de mineral oxidado [6].

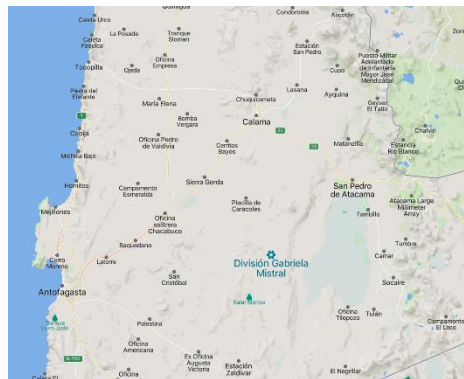


Figura 1.1: Ubicación DGM. Fuente:[6].

La extracción del material de la mina se efectúa a rajo abierto, con camiones operados de manera 100% autónoma. La línea de producción está conformada por procesos de chancado primario, secundario y terciario, junto con todas las etapas de refinamiento de material que conlleva el chancado. Por otro lado, se encuentran procesos de curado en tambores acidificadores, lixiviación en pilas dinámicas, disposición de ripios, extracción por solventes (SX) y electro-obtención [14].

1.1.2 Sistema motriz del harnero vibratorio

Dentro de todo el sistema que conforma un equipo, como un harnero vibratorio, se encuentra el sistema motriz. Este sistema es el que provee el movimiento al harnero vibratorio y dentro de sus partes se encuentran un motor eléctrico y un mecanismo de conexión entre el motor y el excitador del harnero. Este sistema de transmisión muchas veces se hace de manera directa, a través de una unión cardánica. Sin embargo, en este caso, previo a este tipo de unión, se encuentra una reducción mediante poleas. Y finalmente se encuentran las dos estructuras sólidas que soportan este sistema motriz, las cuales están conformadas por una subbase y una base. Cabe destacar, en este punto, que en la mayoría de las veces la estructura que sostiene todo el conjunto motriz no es tan compleja como en este caso. Por lo general, este tipo de sistemas motrices se encuentran montados sobre una columna que sostiene el motor a una altura determinada, y la conexión se realiza de manera directa a través de un eje con uniones tipo cardán. Esto se puede observar en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Imagen de harnero. Fuente:[5].

Por otro lado, en la Figura 1.3 se puede observar el sistema motriz conformado por la subbase y la base, además del motor y de la reducción por poleas que presenta el sistema motriz del harnero terciario.



Figura 1.3: Fotografía sistemas motrices. Fuente: Elaboración propia.

1.2 Importancia del harnero vibratorio en la industria minera

La implementación de una línea de producción continua es una de las principales responsables de que la industria minera sea rentable. Dentro de esta línea de producción, los harneros vibratorios toman una participación muy relevante en el procesamiento del material, lo que hace que mantenerlos funcionando de manera correcta garantice, en gran parte, que la línea de producción no se vea interrumpida.

Otro punto importante es la gran versatilidad que presentan este tipo de equipos, en lo que se refiere a cómo se puede lograr obtener un movimiento en específico, a partir la ubicación de los motores y de la forma en la que se produce la excitación para lograr la vibración del equipo. Además, es relevante la forma en la que se puede balancear el contrapeso para obtener el movimiento deseado y de esta manera poder separar el material en las etapas que sean necesarias.

Por otro lado, no existen suficientes estudios de harneros vibratorios que pongan énfasis en la vida útil de estos equipos según las condiciones en la que están operando, es decir, estudios hechos en el lugar de funcionamiento que propongan mejoras y que detecten patrones de fallas según las condiciones de funcionamiento que presenta el harnero y su sistema motriz. Existen algunos estudios relacionados a la temática de los harneros vibratorios, tales como modelaciones dinámicas [15] y análisis estructurales [16] que analizan en profundidad el comportamiento de estos equipos, según sea el enfoque que se les quiera dar. Es por lo antes mencionado que garantizar de la mejor manera el correcto funcionamiento de este tipo de equipos críticos se vuelve una tarea fundamental, debido al importante papel que juegan en la producción.

1.3 Funcionamiento del harnero vibratorio

Un harnero vibratorio es un equipo que cumple principalmente la función de promover una separación granular entre varios tamaños de material. Su funcionamiento se basa en un principio de vibración, el cual ocurre mediante una excitación provocada por fuerzas centrífugas, generadas por la rotación de masas excéntricas. Esta clase de equipos vibratorios se encuentran montados sobre un conjunto de resortes, los cuales permiten el movimiento vibratorio provocado por el sistema de excitación. En la Figura 1.4 se puede observar de qué forma están montados estos equipos y la disposición que presenta el mecanismo de excitación compuesto por las masas excéntricas.



Figura 1.4: Excitadores harneros. Fuente:[5].

Existen bastantes tipos de harneros, los cuales varían en su configuración con respecto a la forma en la que se posicionan los contrapesos y la geometría que estos presentan. La configuración que se requiera utilizar para un determinado proceso se estudia a partir de cómo se quiere que se genere la estratificación del material, tomando en cuenta que parámetros como la humedad del material y el movimiento de este, son muy relevantes en el proceso de harneado. En la Figura 1.5 se puede observar los distintos tipos de movimientos que se pueden obtener en un harnero vibratorio.

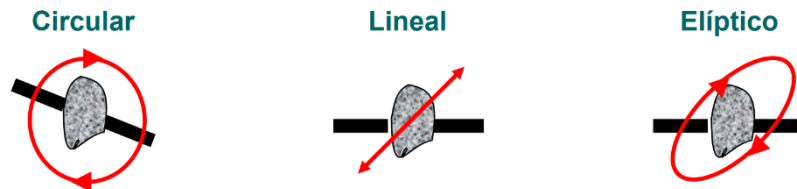


Figura 1.5: Posibles movimientos de partículas en proceso de harneado. Fuente: [5].

Para prevenir que problemas de humedad se conviertan en un obstáculo para el proceso de harneado, es que se utilizan mallas de goma auto-limpiantes, además de otros tipos de herramientas para prevenir obstrucciones en las mallas derivadas de las características que posee el material.



Figura 1.6: Malla de goma. Fuente: [5].

Comúnmente se pensaría que para este tipo de procesos lo que se utilizaría serían mallas de acero, sin embargo, existen muchas limitaciones relacionadas con la fabricación y con el mantenimiento de este tipo de mallas. Es en este punto donde los “*decks*” o mallas de goma cobran una gran importancia, debido a que estas soportan muy bien el impacto del material, poseen buena resistencia al desgaste y son de fácil fabricación, lo que permite que generar mallas de distinto de tamaño de orificio sea un proceso mucho más ágil que para la fabricación de mallas de acero.

1.4 Presentación del problema

Los harneros, en particular los de DGM, tienen un problema histórico que está presente en sus sistemas motrices. En estos la mayoría de sus detenciones que han tenido en los últimos tres años son debido a fallas en el sistema motriz. Sumado a esto, este sistema se mantiene con constantes avisos de los

inspectores del servicio de monitoreo de condición, por altas vibraciones, altas temperaturas y por fallas de los rodamientos del eje flotante.

Según esto es que se vuelve relevante dar solución a este problema, es decir, encontrar las causas del problema que tiene la base motriz y analizar la existencia de zonas resonantes mediante análisis modal y proponer rediseños para las bases.

En el caso del cuerpo del harnero, este presenta fallas menos recurrentes, como por ejemplo la falla provocada por la fatiga de la viga madre. Entonces, para este caso lo más relevante sería poder analizar cuáles deberían ser las condiciones para provocar alguna falla en la viga madre, como por ejemplo grietas.

1.5 Objetivos

En este trabajo se busca estudiar y dar solución a diversos problemas relacionados con el funcionamiento de harneros vibratorios presentes en DGM, como lo son por ejemplo los sistemas motrices. Según esto, es que se plantean los siguientes objetivos.

1.5.1 Objetivo principal

Realizar un estudio detallado de las bases de los sistemas motrices que brindan la movilidad al harnero.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar fallas en el diseño y montaje de las bases motrices que puedan influir en un funcionamiento inadecuado.
- Proponer mejoras a las bases motrices, tales como modificaciones o plantear rediseños basados en simulaciones que permitan mejorar el funcionamiento de estas estructuras.

1.6 Hipótesis

Para la realización de este trabajo se plantean las siguientes hipótesis.

- Las bases de los sistemas motrices presentan un problema de vibración que provoca que los pernos que unen la base y la subbase se suelten y esto provoque que el sistema pierda rigidez, además de que el posicionamiento de ciertos perfiles que conforman la base no es el más indicado, provocando un alto riesgo de grietas. Por lo tanto, se presume que el diseño de las bases del sistema motriz no es el más adecuado.
- El estudio de la vida útil del harnero se puede basar en realizar un análisis de la viga madre de este, a partir de un análisis de elementos finitos y estudiar la falla a la fatiga.

1.7 Metodología

La metodología de trabajo se basa en mantener un contacto periódico semana a semana con las personas que se encuentran presentes en DGM, con el fin de ir conociendo las condiciones de trabajo, tanto del harnero vibratorio, como de las bases motrices.

Para la ejecución de este trabajo se usa el método de elementos finitos (FEM). El software en el que se desarrollan los análisis corresponde a FEMAP. En una primera etapa, se considera la obtención de material que permita generar un dibujo en formato digital, con el fin de poder realizar estudios de los sistemas a través de análisis modales mediante herramientas de elementos finitos. Posteriormente, se plantea determinar y visualizar, a través del software antes mencionado, como se deforma este sistema en operación, basándose en las simulaciones obtenidas a través del método de elementos finitos.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

En este punto es necesario hacer una breve introducción al marco teórico referente a los análisis que se desarrollan en el trabajo. Se debe tener claridad de los conceptos a utilizar y los alcances que tiene el estudio, en lo que se refiere a la teoría que se utiliza. Se realiza una breve recopilación de lo referente al estudio mediante elementos finitos y sobre el análisis de condiciones vibratorias.

2.1 Modelado a partir del FEM

El análisis de elementos finitos es un método numérico empleado para la solución de problemas de ingeniería, los cuales cuáles la mayoría de las veces presentan un alto nivel de complejidad, dado que la gran mayoría de los problemas que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales. Esto porque muchas veces obtener una solución netamente a través de expresiones analíticas de mecánica de sólidos sea una tarea imposible. La solución que propone la formulación de elementos finitos propone que el problema sea planteado a través de una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de requerir una resolución a través de ecuaciones diferenciales complejas, como lo plantearía un método analítico. Es importante destacar que los cuerpos a estudiar deben ser discretizados [3]. Esto consiste en la división del cuerpo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños interconectados por medio de puntos o nodos, los cuales forman superficies y se comportan como volúmenes de control independientes, los que a su vez son afectados por las condiciones de frontera que afectan al cuerpo estudiado como un todo. El objetivo de este método es conocer el comportamiento de la estructura a través de incógnitas derivadas de los elementos y de los nodos de los elementos, las cuales generalmente corresponden a desplazamientos. Los valores de estas incógnitas son aproximados, sin embargo, mientras más elementos existan en la subdivisión, más exacta será la solución, en lo que se refiere a que tan cerca del comportamiento real serán los resultados extraídos [8].

Una parte muy relevante del FEM es lo referente a los tipos de elementos que se utilizan. En la mayoría de los análisis prácticos es más efectivo el uso de los llamados elementos finitos isoparamétricos. La idea principal de la formulación de elementos finitos isoparamétricos es conseguir una relación entre los desplazamientos del elemento en cualquier punto de su interior y los desplazamientos a través de funciones de interpolación. En el FEM aplicado a problemas estructurales, se resuelven los desplazamientos nodales de toda la malla de elementos finitos y luego es posible conocer la información de los desplazamientos de un punto cualquiera dentro del elemento gracias a dichas funciones de interpolación [9].

Dentro del grupo de elementos que se pueden utilizar para modelar geometrías delgadas, se pensaría en utilizar elementos tridimensionales. Sin embargo, estos elementos presentan algunas dificultades. Por un lado, estos solo presentan tres grados de libertad en cada nodo, como se observa en la Figura 2.1, lo que provoca grandes coeficientes de rigidez para aquellos desplazamientos a lo largo de un borde correspondientes al espesor, lo que implica problemas numéricos por mal condicionamiento de ecuaciones [7].

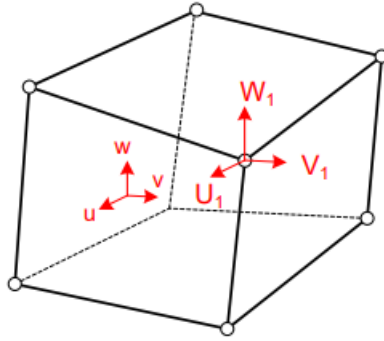


Figura 2.1: Grados de libertad elemento tridimensional. Fuente:[7].

Por otro lado, el uso de varios nodos a través del espesor resulta en un gran aumento en el uso de memoria y tiempos de cómputo. Es por esto, por lo que es más conveniente utilizar elementos de placa y de cáscara para modelar geometrías delgadas. Estos poseen grados de libertad rotacionales y traslacionales por nodo. Los grados de libertad corresponden a tres traslacionales y dos rotacionales, omitiendo el grado de libertad referente a la rotación del elemento con respecto al eje normal al elemento, como se observa en la Figura 2.2 [7].

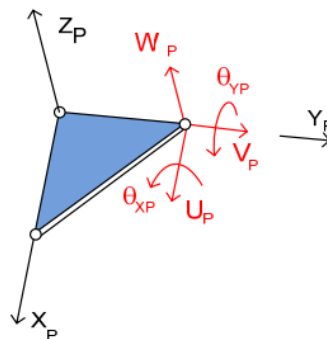


Figura 2.2: Cinco grados de libertad elementos de placa. Fuente:[7].

Sin embargo, se suele considerar este grado de libertad, asignándole una rigidez nula con objeto de tener seis grados de libertad por nodo, como se observa en la Figura 2.3 [7].

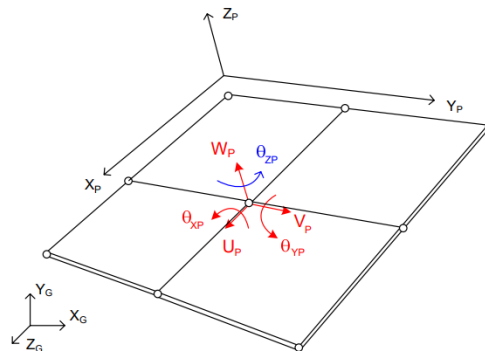


Figura 2.3: Seis grados de libertad elementos de placa. Fuente:[7].

Finalmente, la última consideración a tener en cuenta es la forma del elemento con la que se realiza el mallado. Comúnmente se suelen utilizar elementos triangulares o cuadrilaterales. Sin embargo, existe una gran diferencia entre estos dos tipos de elementos. Por un lado, como se observa en la ecuación (1) los elementos triangulares poseen una matriz de rigidez constante que no depende de alguna coordenada. Esto hace que las deformaciones sean constantes en todo el elemento, y a su vez también lo serán las tensiones. Por lo tanto, si se emplea este elemento, el campo de tensiones en el material se aproxima mediante una serie de valores constantes, formando una superficie escalonada. En consecuencia, este elemento sólo debe utilizarse con mallados muy finos si es que se prevé un campo de tensiones variable, o bien si se considera mallar un elemento rígido a conveniencia [9].

$$B = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & : & b_2 & 0 & : & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & : & 0 & c_2 & : & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & : & c_2 & b_2 & : & c_3 & b_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Por otro lado, en la ecuación dos, se tiene que la matriz de rigidez de los elementos rectangulares tiene términos lineales, por lo que ésta es la variación permitida para el campo de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Este tipo de elemento es, por lo tanto, bastante más preciso que el triangular, que solo permite valores constantes de tensión y de deformación unitaria [9].

$$B = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} (c+y) & 0 & : & -(c+x) & 0 & : & -(c-y) & 0 & : & (c-y) & 0 \\ 0 & (b+x) & : & 0 & (b-x) & : & 0 & -(b-x) & : & 0 & -(b+x) \\ (b+x) & (c+x) & : & (b-x) & -(c+y) & : & -(b-x) & -(c-y) & : & -(b+x) & (c-y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 Análisis de condiciones vibratorias

El fenómeno de vibración se considera como una oscilación o como un movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se conoce como vibración de cuerpo entero, ya que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento. El movimiento más sencillo que se puede tener es el movimiento armónico sencillo, el cual es un movimiento en una sola dirección de una masa controlada por un resorte único. Sin embargo, en la realidad es bastante improbable que exista un sistema que presente movimiento oscilatorio en una sola dirección.

El fenómeno de resonancia es un estado de operación en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura de la máquina. Una frecuencia natural es una frecuencia a la que una estructura vibrará si uno la desvía y después la suelta. Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibraciones que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente.

En una máquina que produce un espectro ancho de energía de vibración, la resonancia se podrá ver en el espectro, como un pico constante, aunque varíe la velocidad de la máquina. El pico puede ser

agudo o puede ser ancho dependiendo de la cantidad de amortiguación que tenga la estructura en la frecuencia en cuestión [10].

El análisis modal aplicado a una estructura es el estudio de sus modos de vibración y las frecuencias a las que estos tienen lugar. Todas las estructuras tienden a vibrar naturalmente de acuerdo con sus modos de vibración, siempre y cuando estas no se encuentren bajo acciones externas que den lugar a lo que se conoce como vibraciones forzadas.

$$F = [M] \cdot \ddot{x} + [C] \cdot \dot{x} + [K] \cdot x \quad (3)$$

En la ecuación anterior F corresponde a la fuerza de excitación externa de la estructura, x es el desplazamiento de la estructura y sus derivadas primera y segunda son la velocidad y aceleración respectivamente. $[M]$, $[C]$, y $[K]$ son la matriz de masas, amortiguación y rigidez. Si se piensa en una estructura que ha sido sometida a una fuerza de tipo impulso durante un instante, la estructura se encontraría oscilado tras aplicar dicha fuerza. Esto implica que para $F = 0$, existe movimiento oscilatorio de la estructura, ya que los tres términos de la ecuación son no nulos. Este ejemplo sirve para entender que cada uno de los modos de vibración son independientes de la fuerza a la que ha sido sometida la estructura, de forma que únicamente dependerá de las tres matrices introducidas anteriormente. Dichas matrices son inherentes a la propia estructura y, por lo tanto, los modos de vibración y la frecuencia a la que estos se producen solo dependerán de parámetros intrínsecos a ella y a las condiciones de contorno a las que se encuentre sometida [11].

CAPÍTULO 3: Modelado del sistema motriz

Los sistemas motrices por analizar corresponden específicamente a los utilizados en los harneros terciarios instalados en DGM-Codelco. Estos Harneros reciben la denominación de 145-SN-009-010 y 145-SN-005-006. En lo que resta del desarrollo del trabajo, se distinguirá a cada sistema motriz con la misma denominación que posee el harnero correspondiente a cada sistema. En la Figura 3.1 se pueden observar fotografías de estos sistemas motrices.

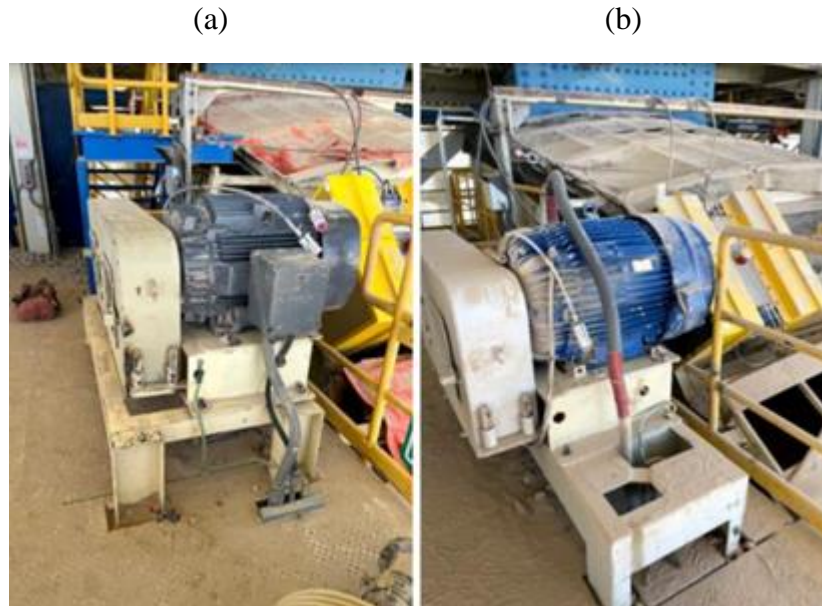


Figura 3.1: Fotografías sistemas motrices: (a) 145-SN-005-006, (b) 145-SN-009-010. Fuente: Elaboración propia.

El primer paso para poder realizar el estudio de estas estructuras corresponde a llevar la información existente en los planos a un modelo geométrico en 3D. Esto con el fin de corroborar que no falten piezas en los planos al realizar una comparación con las fotografías existentes o si es que faltan cotas para poder determinar alguna geometría de alguna pieza relevante y realizar algún tipo de levantamiento en terreno. Se realizaron ambos modelos geométricos de los sistemas motrices, a la vez que se generó un modelo con elementos de placa y otro con elementos de volumen, para cada sistema. En una primera instancia, solo se trabaja con el sistema motriz 145-SN-009-010. Según esto, en la Figura 3.2 se puede observar el modelo geométrico con elementos de volumen de la estructura antes mencionada. En amarillo se puede observar la subbase y en verde la base del sistema motriz, además de la rotulación que recibe cada agujero correspondiente a cada perno.

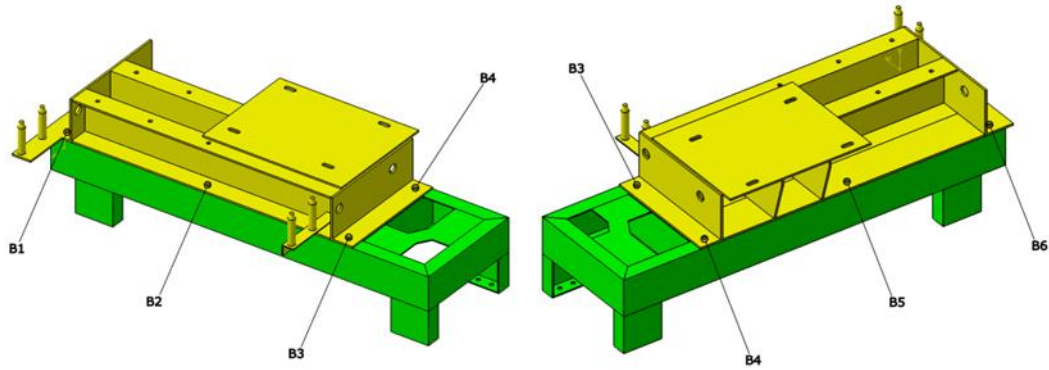


Figura 3.2: Modelo geométrico sistema motriz 145-SN-009-010. Fuente: Elaboración propia.

3.1 Objetivos del modelado

En primer lugar, el objetivo principal que se intenta cumplir en este capítulo es el de hacer un modelado de elementos finitos de la estructura presentada en la Figura 3.2. Esto con el fin de identificar en qué condiciones se encuentra trabajando el sistema motriz. Este, históricamente, ha presentado fallas provocadas por la vibración de la estructura y según esto, la meta en un principio es lograr simular el funcionamiento del sistema motriz 145-SN-009-010 y corroborar la condición vibratoria de este. Con esto logrado, se procede a encontrar cuáles son las zonas que presentan una condición más crítica de funcionamiento, según las condiciones de desplazamiento que se tengan. Por otro lado, se busca conocer el estado de esfuerzos de los pernos de unión entre la base y la subbase, ya que en estos se presenta un problema referente a la soldadura, por lo que se busca analizar la influencia de la precarga o apriete de los pernos.

Finalmente, una vez cumplido lo antes mencionado he identificado las zonas críticas de funcionamiento, se procede a realizar simulaciones con distintos tipos de modificaciones hechas al sistema motriz.

3.2 Condiciones de borde sobre la construcción del modelo

Al momento de realizar el modelo geométrico a partir de los planos proporcionados, se observa la falta de información referente a componentes como el sistema de transmisión (polea conductora, polea conducida), eje flotante junto con sus soportes y también el motor, además de la ausencia de la geometría de pernos. Es por esto por lo que se realizan ciertas aproximaciones geométricas, las cuales son debidamente justificadas en el apartado seleccionado para presentar la construcción del modelo. En la Tabla 3.1 se pueden observar los datos referentes a los pesos de los componentes y las velocidades de giro del sistema de transmisión por poleas, además de la potencia del motor. Estos últimos datos son relevantes para determinar el torque y las fuerzas que interactúan en el sistema motriz. Según la información entregada, el material de construcción para la estructura del sistema motriz corresponde a acero A36.

Tabla 3.1: Propiedades de los elementos del sistema motriz.

Polea conductora	Peso [kg]	31.5
	Velocidad de giro [RMP]	1480
Polea conducida	Peso [kg]	88.4
	Velocidad de giro [RPM]	806
Motor	Peso [kg]	880
	Velocidad de giro [RPM]	1480
	Potencia [kW]	75
Eje flotante y soporte	Peso [kg]	78.6

3.2.1 Consideraciones para el análisis modal

En primer lugar, dado que se presume que del sistema motriz 145-SN-009-010 presenta condiciones vibratorias anómalas, lo que se pretende en un principio es analizar el estado de funcionamiento a partir de un análisis modal y de esta forma extraer los modos de vibrar del sistema motriz. Para realizar un análisis modal, lo importante es tener en consideración las fijaciones del sistema a analizar, el peso de este y la geometría, además de considerar la aceleración de gravedad. Esta información está disponible a través de planos proporcionados por DGM en anexo A.1. Este sistema motriz está compuesto por una estructura de acero de 248.65 [kg], un conjunto motriz conformado por un motor eléctrico, una polea conductora y una polea conducida, junto con el eje flotante, además de los soportes y rodamientos de este. Este conjunto motriz tiene un peso total de 1078.52 [kg], lo que suma un peso total de 1327.17 [kg]. Para este caso, como se trata de un análisis modal, es decir, se quiere extraer los modos de vibrar del sistema, no es necesario introducir las condiciones de borde referentes a reacciones de fuerza y torque que tenga el sistema.

Es importante recalcar el hecho de estudiar la influencia de los pernos y el apriete de estos. Es por esto por lo que, se hace el análisis modal a partir de dos casos. Primeramente, pensando las uniones apernadas como un contacto perfectamente rígido definido a través de una zona de unión, es decir, pensando en que las zonas de contacto antes mencionadas se encuentran pegadas o soldadas. Por otro lado, la unión se generará a través de la modelación de los pernos, como elementos de viga sin una precarga definida y considerando las mismas zonas de contacto.

3.2.2 Condiciones de borde del análisis estático

Una de las consecuencias más importantes que se produce como resultado del mal funcionamiento del sistema motriz, es la soltura de los pernos de unión entre la base y la subbase. Además, otro punto importante a analizar es lo que se genera en las placas que se mantienen en contacto entre la base y la subbase, ya que estas presentan deformaciones en ciertas zonas de contacto. Según lo antes presentado, es importante analizar que ocurre en los pernos cercanos a esta zona, mediante la realización de un análisis estático, y de esta forma analizar los esfuerzos a los que estos se encuentran sometidos, a la vez que se va analizando el apriete de estos.

Como condiciones de borde se tiene que la principal fuerza que se encuentra en el sistema es la que genera el torque del motor, el cual es de 484 [N·m]. Esta se determina a partir de la ecuación (2), utilizando la potencia del motor (P) y las revoluciones por minuto de este (ω).

$$T = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot \omega} \quad (4)$$

En la Figura 3.3 se muestran las fuerzas presentes en las poleas del sistema motriz. En color azul está representada la polea conductora y en color amarillo la polea conducida.

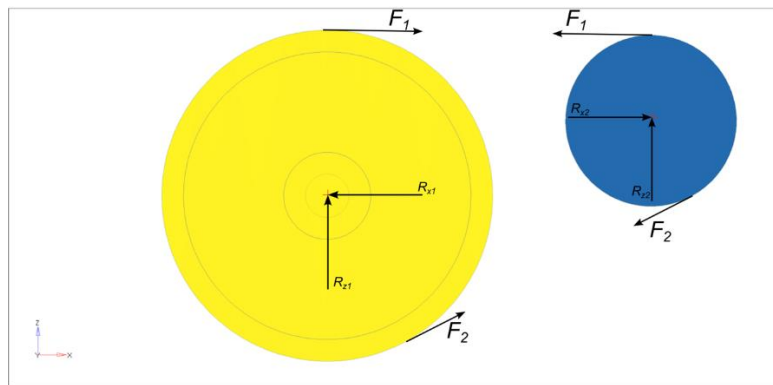


Figura 3.3: Fuerzas presentes en el sistema de poleas. Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones en el eje flotante producidas por la polea conducida están representadas a través de R_{z1} y R_{x1} . Por otro lado, las reacciones de la polea conductora anclada al motor se indican a través de R_{z2} y R_{x2} . Las otras fuerzas que actúan en el sistema corresponden a las del sistema de poleas. Estas fuerzas poseen la misma dirección, mismo módulo, pero un sentido distinto y se calculan a partir del torque y sus radios respectivos. Se representan a través de F_1 y F_2 , siendo F_1 la fuerza que representa el lado apretado y por ende el más tenso de la correa y F_2 es el lado menos tenso o lado “flojo”. Comúnmente se suele tomar la razón de la fuerza del lado apretado sobre el lado flojo como 5 [17]. Además, otra relación importante es la fuerza neta que asociada al torque impulsor la cual se representa en la ecuación (5).

$$F_n = F_1 - F_2 \quad (5)$$

Sin embargo, la fuerza que se transmite hacia el eje flotante y por lo tanto hacia el sistema motriz no es esta fuerza neta (F_n), sino que es la suma de F_1 y F_2 . Esta expresión se muestra en la ecuación (6).

$$F_s = F_1 + F_2 \quad (6)$$

Combinando las relaciones se puede obtener que $F_s = 1.5F_n$ [Norton, 2011, p. 423].

Utilizando la potencia del motor, la velocidad de giro, radio de cada polea y la ecuación (7) se puede obtener la fuerza neta asociada al torque impulsor. Cabe destacar que para calcular esta fuerza neta se puede hacer utilizando los datos de la polea conductora o de la polea conducida, con la precaución de que los datos a utilizar sean consecuentes, en lo que se refiere a revoluciones por minuto y radios. Con la fuerza neta obtenida se puede calcular la fuerza transmitida al sistema motriz a partir de la relación $F_s = 1.5F_n$.

$$F_n = \frac{T}{r} \quad (7)$$

$$r_1 = 0.171 [m] \text{ (Radio polea conductora)} \quad r_2 = 0.312 [m] \text{ (Radio polea conducida)}$$

$$F_n = 2814 [N]$$

$$F_s = 4221 [N]$$

3.3 Construcción del modelo

A partir de los planos entregados por la empresa patrocinante, se procede a realizar el modelo geométrico del sistema motriz. Dicho modelo se realiza utilizando placas para generar las geometrías, ya que el modelo de elementos finitos se realiza con elementos de placa, dado que estos poseen más grados de libertad que los elementos 3D y además esto permite que el modelo sea más liviano en cuanto a requerimientos computacionales.

La construcción de los cuerpos de carácter rígido es a partir de volúmenes y no de placas. Para el caso de los cuerpos de volumen, se utilizan elementos de forma tetraédrica, a la vez que se calibra el peso de los cuerpos con la densidad que se les impone en el software, para poder obtener el peso real. La utilización de elementos de carácter triangular se basa en que estos presentan una matriz de rigidez de valores constantes, lo que hace que se produzca una especie de aristas rectas en el modelamiento del cuerpo. Dado que estos no se deforman en el sistema, no interesa utilizar elementos de mayor calidad que retrasen o entorpezcan el tiempo de cálculo sin ser necesario. El mallado de todas las partes del sistema motriz se puede observar en la Figura 3.4.

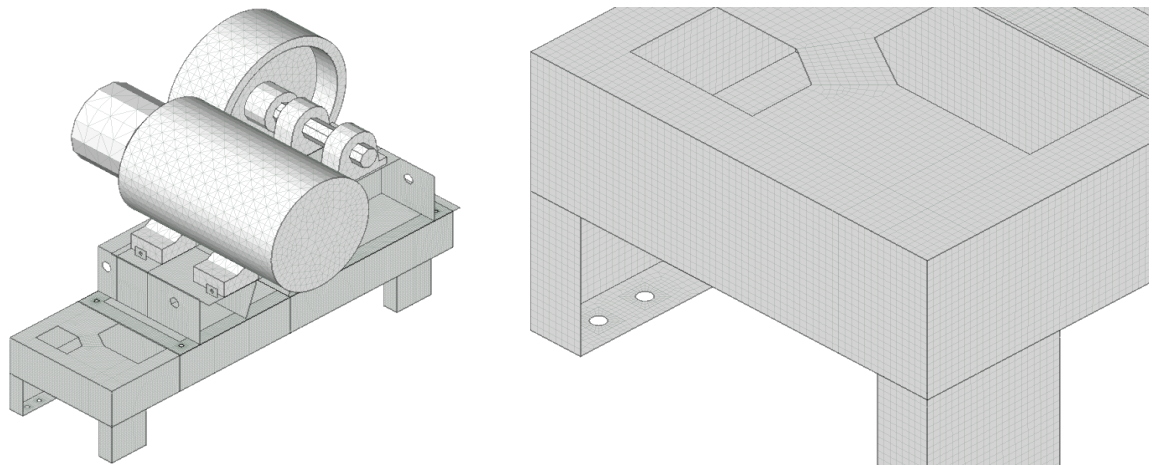


Figura 3.4: Mallado de las estructuras que conforman el sistema motriz. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, según lo antes mencionado, la construcción de la malla se realiza con elementos de 10 [mm] para la estructura y para asegurar de cierta forma que el mallado quede de la mejor forma posible, se realiza un mapeo en toda la superficie del modelo, es decir, se trazaron líneas con el objetivo de forzar que los nodos de la malla pasen por esas zonas y de esta forma disminuir los elementos que no se ajusten a la forma rectangular con la que se configura el modelo. Esto permite que la calidad del mallado aumente significativamente en comparación con hacer un mallado sin un mapeo previo, ya que esto genera que se creen elementos triangulares para poder ajustar el mallado.

3.3.1 Análisis modal sin modelación de pernos

Para realizar las conexiones en la simulación o uniones apernadas entre los distintos cuerpos, se considera que estos se encuentran perfectamente unidos, lo cual se logra a través de la condición de “*Glued*”. Se considera una zona de unión alrededor del agujero de los pernos para poder ejecutar la unión según lo requiere el programa. En la Figura 3.5 se pueden observar las regiones de contacto entre los cuerpos en las zonas circundantes de los pernos.

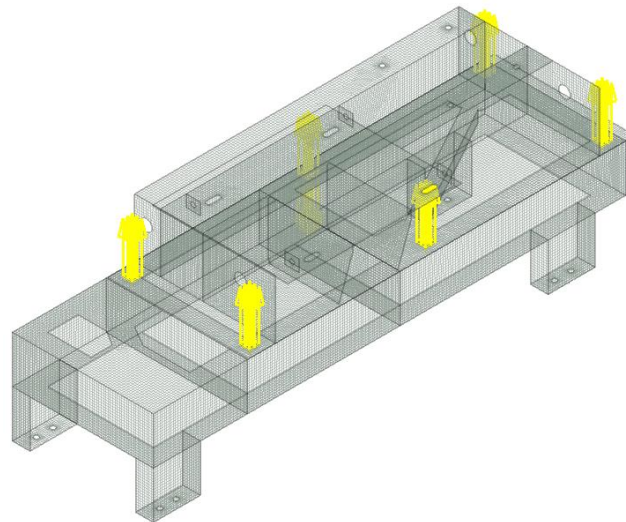


Figura 3.5: Configuración de contacto para unión rígida. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Modelación de pernos

Para generar la unión entre la subbase y la base a través de la modelación de los pernos, es necesario separar ambas estructuras en la zona de unión entre la base y la subbase según la distancia del grosor de los perfiles y placas. Esto se puede observar en la Figura 3.6 y se corrobora al activar la opción “*Thickness*” de FEMAP.

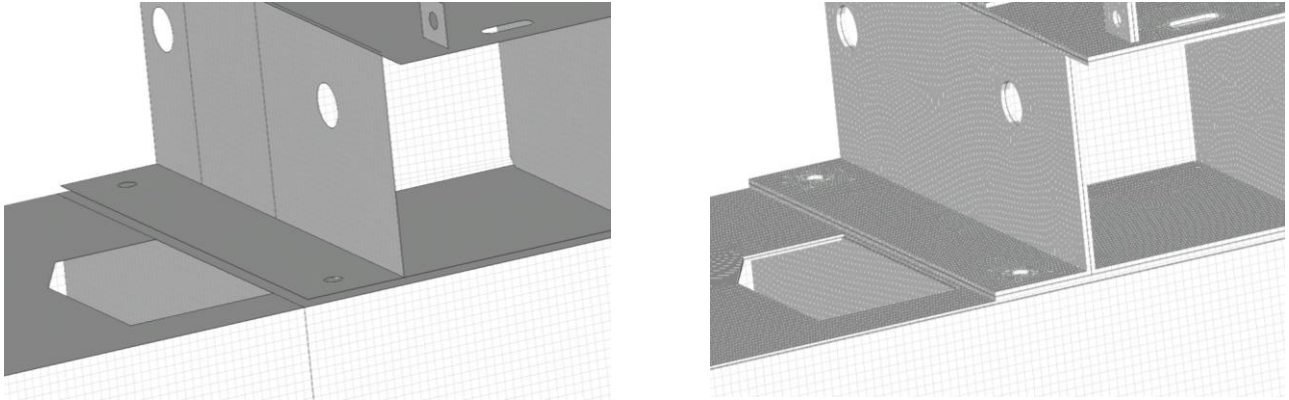


Figura 3.6: Visualización de espesor de elementos. Fuente: Elaboración propia.

Esto con el objetivo de poder modelar claramente la viga que representa al perno, ya que en este caso es imposible que esta se pueda apreciar al no separar las dos partes. Posteriormente, con la opción “Custom Tools” - “Meshing” - “Hole To Hole Fastener” se puede generar nodos spider en ambos agujeros que delimitan la ubicación del perno. Esto se puede observar en la Figura 3.7. Estos nodos spider conforman los extremos del elemento de viga y de esta forma se puede modelar el perno a través de una representación.

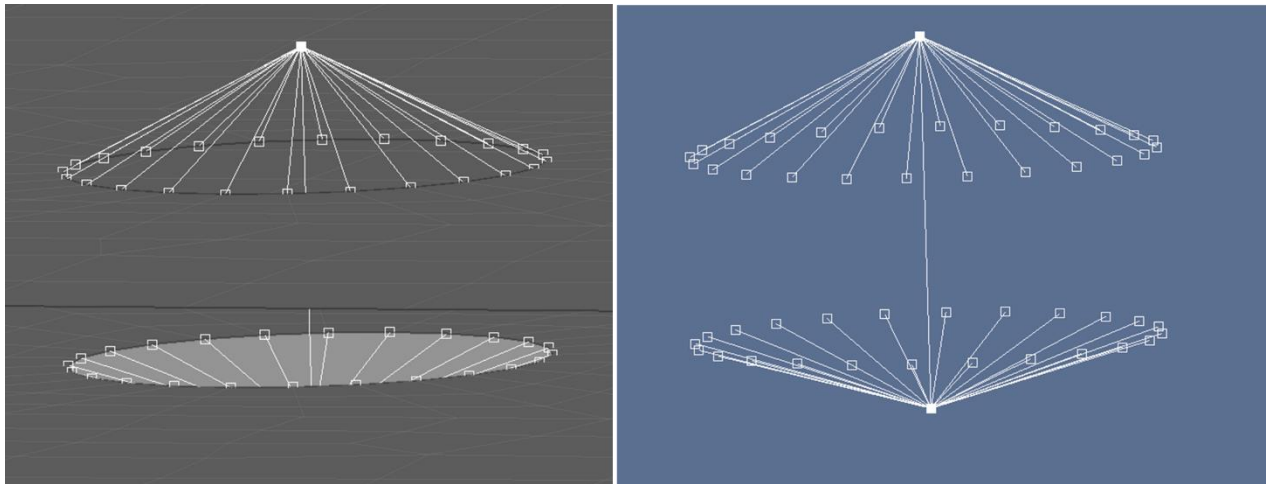


Figura 3.7: Representación de pernos mediante vigas. Fuente: Elaboración propia.

Ahora es necesario realizar una última modificación, la cual corresponde a mover la ubicación de los nodos spider, ya que estos se encuentran en la mitad del espesor de cada elemento. Por lo tanto, el nodo spider superior se debe subir 5 [mm] y el inferior se debe bajar 3 [mm], ya que el espesor de los elementos superiores e inferiores corresponden a 10 y 6 [mm] respectivamente. Esto último se hace con el objetivo de poder ubicar los límites del perno según el espesor asignado a los elementos de esa zona de unión. La modificación antes mencionada se puede observar en la figura anterior, en donde los nodos spider se encuentran desplazados desde la zona de unión delimitada por los agujeros de los pernos. Es necesario cambiar la condición de contacto en estas zonas. Se debe poner un “gap” igual a 8 [mm], lo que corresponde a la distancia separación entre ambas estructuras y cambiar la condición de “Glued” a “Contact”.

Para poder completar la modelación de los pernos es necesario tener en cuenta la precarga que se les debe dar a estos. Este tipo de carga se realiza seleccionando el o los elementos de viga que representan a los pernos y según esto se aplica la fuerza que se debe ejercer, según la precarga que se quiera aplicar. Para este caso, y según el material de los pernos, se aplica una fuerza que implica un 70% del esfuerzo de fluencia del material de los pernos. Según lo anterior, la fuerza aplicada es de 175 [KN].

3.3.3 Análisis modal con modelación de pernos

Idealmente, para acercar el modelo a las condiciones reales de funcionamiento es necesario modelar los pernos estructuralmente. En una primera instancia se realiza una simulación sin precarga de pernos. En este caso, dado que la zona de unión entre la subbase y la base son las más críticas, solo se modelan estos pernos de unión. En este caso se hace utilizando pernos grado 8.8, los cuales poseen un límite de fluencia aproximado de 500 [MPa], según el acero SAE 1040. Sin embargo, para tener datos más verídicos, se utilizó un material similar presente en la librería de FEMAP el cual corresponde al acero AISI 4130.

3.3.4 Análisis estático

Para la realización del análisis estático, se considera ubicar las fuerzas existentes en puntos estratégicos, con el fin de tener un modelo lo más cercano a las condiciones reales. Según esto se ubica el torque del motor justo en el eje, en la conexión con la polea conductora. La representación de este torque se puede visualizar en la Figura 3.8 y posee un módulo de 484000 [N-mm].

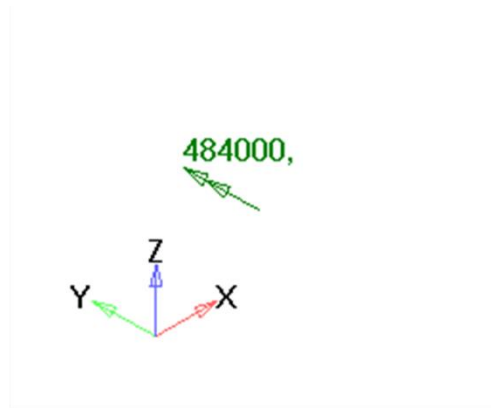
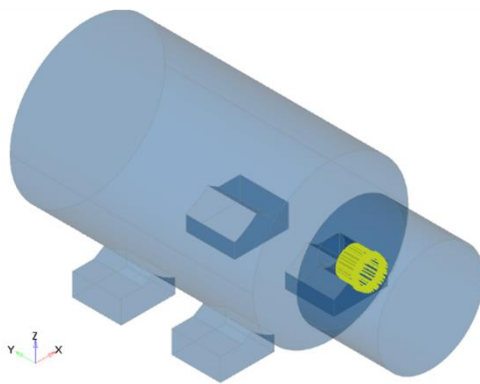


Figura 3.8: Posición y sentido de torque del motor. Fuente: Elaboración propia.

Las otras fuerzas en el sistema corresponden a las que se encuentran en el sistema de poleas. Estas, como se menciona en apartados anteriores, tienen un módulo de 4221 [N]. Estas fuerzas, para poder introducir las en el programa, se realiza mediante una descomposición utilizando como referencia las distancias que existen entre las poleas, las cuales presentan 743 [mm] y 172 [mm] de distancia horizontal y vertical respectivamente.

3.4 Funcionamiento y comportamiento de los sistemas

Para determinar el estado de funcionamiento del sistema motriz, se realizan distintos tipos de análisis. Esto con el objetivo de conocer cómo se comporta el sistema bajo distintas configuraciones, con el

fin de emular los problemas que se detectan en terreno. Se debe tener en cuenta que las unidades de medida para los esfuerzos que se muestran en las imágenes posteriores corresponden a megapascuales (MPa).

3.4.1 Análisis modal sin modelación de pernos

Para el caso ideal de unión rígida entre las estructuras se realiza un contacto “*Glued*” entre la base y la subbase. A partir de esto es que se realiza el análisis modal de la estructura. Los resultados del análisis se muestran a continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados análisis modal sin modelación de pernos.

Modo	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [CPM]	Mx	My	Mz	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z
1	13.29	797.67	0.03%	52.54%	5.85%	63.20%	5.58%	46.12%
2	30.32	1819.44	27.70%	4.51%	49.76%	17.02%	88.60%	1.02%
3	33.16	1989.46	28.25%	4.15%	32.87%	17.53%	1.64%	4.38%
4	49.12	2947.1	10.01%	0.42%	5.65%	0.25%	1.23%	5.25%
5	61.17	3670.25	0.02%	34.63%	3.58%	1.14%	0.93%	18.46%
6	89.25	5355.01	0.38%	0.20%	0.34%	0.06%	0.12%	8.70%
7	97.84	5870.14	2.14%	1.09%	0.12%	0.01%	0.17%	7.42%
8	126.89	7613.33	1.60%	0.38%	0.50%	0.02%	0.02%	0.51%
9	133.93	8035.51	5.97%	0.15%	0.00%	0.00%	0.00%	1.13%
10	139.48	8369.04	0.13%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%
11	153.75	9225.25	1.38%	0.19%	0.15%	0.04%	0.04%	0.38%
12	170	10200.16	3.71%	0.15%	0.16%	0.00%	0.69%	0.81%
13	170.98	10258.84	11.61%	0.48%	0.21%	0.20%	0.12%	2.50%
14	182.06	10923.55	4.74%	0.19%	0.07%	0.00%	0.00%	0.65%
15	197.48	11848.51	0.42%	0.86%	0.00%	0.25%	0.02%	1.53%
16	216.74	13004.33	0.03%	0.00%	0.04%	0.01%	0.02%	0.00%
17	242.13	14527.58	0.00%	0.00%	0.38%	0.05%	0.34%	0.49%
18	266.43	15985.78	0.43%	0.00%	0.00%	0.03%	0.08%	0.29%
19	268.79	16127.54	1.13%	0.01%	0.25%	0.15%	0.36%	0.10%
20	273.77	16426.1	0.31%	0.00%	0.05%	0.03%	0.04%	0.14%

En esta tabla se pueden observar en las últimas seis columnas los porcentajes de masa efectiva relacionados a cada modo de vibrar. Un punto importante para destacar es el primer modo de vibrar, el cual presenta una frecuencia bastante cercana a la frecuencia de giro que posee la polea conducida. Esto implica que se podría producir una condición de resonancia en el sistema entre el primer modo de vibrar y el giro de la polea conducida y el eje flotante.

3.4.2 Análisis modal con modelación de pernos

Pensando en una condición más real de funcionamiento, se realizó un análisis modal con la modelación de los pernos de unión como elementos de viga. Dicha construcción del modelo se explica en apartados anteriores, por lo que en esta oportunidad solo se da importancia a los resultados de los análisis.

Tabla 3.3: Resultados análisis modal con modelación de pernos.

Modo	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [CPM]	Mx	My	Mz	ϕ_x	ϕ_y	ϕ_z
1	11.34	680.37	0.04%	53.45%	5.15%	65.56%	5.05%	46.91%
2	26.78	1606.75	22.02%	4.31%	57.89%	18.96%	91.95%	1.10%
3	29.44	1766.49	31.90%	2.34%	27.61%	13.88%	0.30%	2.76%
4	45.63	2737.54	10.99%	0.11%	5.63%	0.39%	0.65%	5.41%
5	59.4	3563.85	0.29%	35.65%	2.05%	0.60%	0.47%	19.85%
6	83.57	5014.01	0.14%	0.90%	0.08%	0.02%	0.21%	13.05%
7	93.79	5627.36	2.40%	0.48%	0.17%	0.02%	0.03%	1.92%
8	120.73	7244.01	3.33%	0.50%	0.45%	0.02%	0.04%	0.68%
9	130.33	7819.9	2.53%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.68%
10	132.18	7930.65	5.73%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.88%
11	147.14	8828.37	0.00%	0.09%	0.10%	0.04%	0.05%	0.00%
12	160.99	9659.50	17.55%	0.61%	0.00%	0.05%	0.00%	3.99%
13	170.00	10199.73	0.07%	0.00%	0.37%	0.08%	0.82%	0.01%
14	179.07	10743.93	1.25%	0.54%	0.02%	0.02%	0.00%	0.01%
15	192.78	11566.77	0.12%	0.83%	0.00%	0.18%	0.00%	1.69%
16	204.73	12284.01	0.08%	0.00%	0.04%	0.00%	0.03%	0.03%
17	235.21	14112.36	0.05%	0.00%	0.33%	0.03%	0.24%	0.41%
18	248.83	14929.74	0.01%	0.01%	0.03%	0.01%	0.00%	0.42%
19	260.79	15647.42	0.95%	0.00%	0.00%	0.07%	0.08%	0.03%
20	266.49	15989.43	0.57%	0.00%	0.08%	0.07%	0.06%	0.18%

Como se puede observar en la Tabla 3.3, los valores de los modos de vibrar disminuyeron en comparación a los valores entregados por el análisis modal sin la modelación de los pernos. Esto principalmente se debe a que la rigidez disminuye, ya que el elemento viga del perno quita rigidez al sistema, lo que permite que los modos de vibrar también disminuyan. Se observa que el primer modo de vibrar se aleja un poco de la frecuencia de giro que posee la polea conducida, sin embargo, no lo suficiente como para asegurar que no se pueda llegar a la resonancia.

3.4.3 Análisis estático sin precarga de pernos

Para este tipo de análisis es necesario analizar el estado de esfuerzos de la estructura y de los pernos. En la Figura 3.9 se puede observar el esfuerzo presente en cada perno. Estos no presentan precarga, por lo que los esfuerzos mostrados solo se deben a la acción de las fuerzas del sistema de poleas y de la acción del torque del motor.

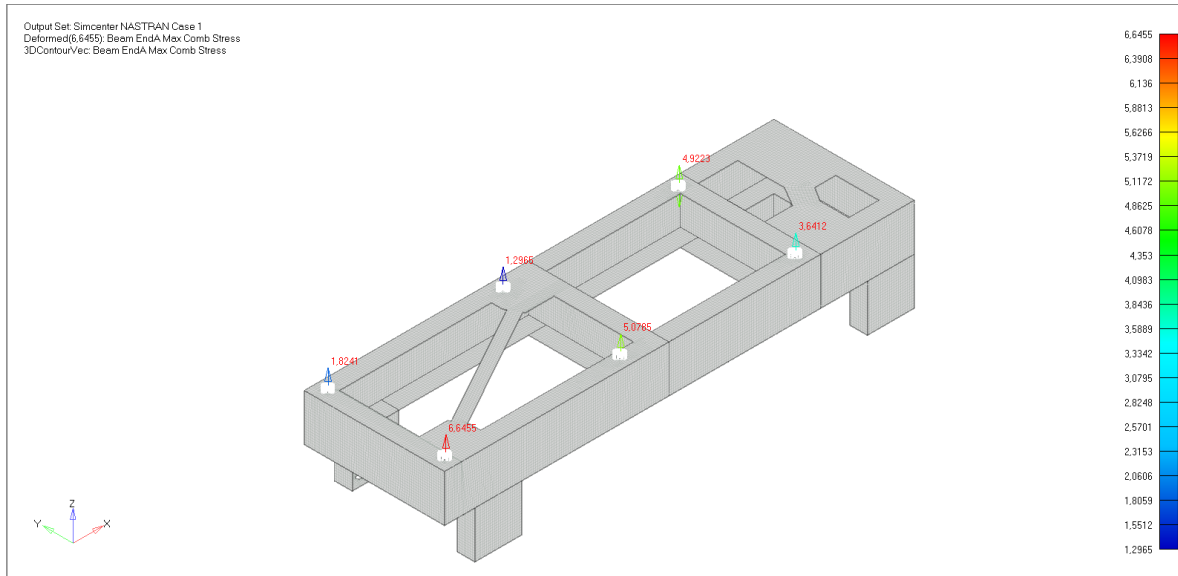


Figura 3.9: Esfuerzos en pernos sin precarga. Fuente: Elaboración propia.

Este primer acercamiento al comportamiento de los pernos es de utilidad para conocer cuáles de estos están sometidos a una mayor carga y según esto se aplica una precarga diferenciada tomando en cuenta principalmente a los pernos que presenten un mayor esfuerzo. Se observa que el esfuerzo máximo que existe en estos es de alrededor de 6.64 [MPa].

Para conocer cómo se deforma el sistema a raíz de las fuerzas existentes y corroborar que los desplazamientos tengan sentido, es que se analiza cómo se mueve el sistema según las cargas de este. Para corroborar esto es necesario amplificar la escala de deformación como mínimo a 100 veces para observar esto claramente. En la Figura 3.10 se puede observar la deformada del sistema.

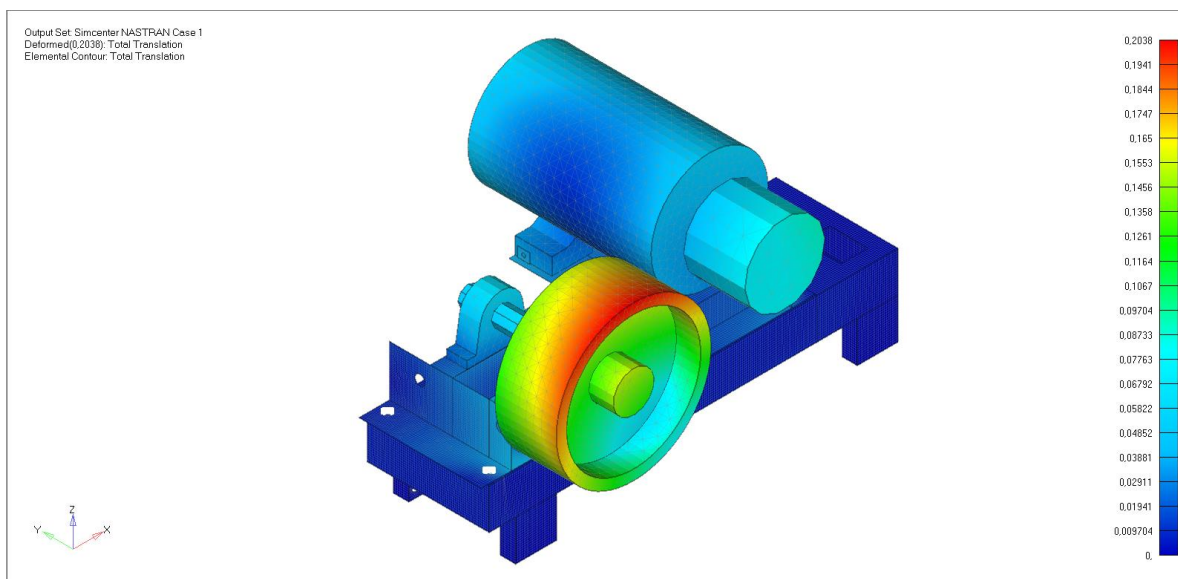


Figura 3.10: Deformada del sistema motriz. Fuente: Elaboración propia.

Otro punto importante es mostrar los esfuerzos principales de compresión y tracción a los que está sometido el sistema. Estos se observan en la Figura 3.11 para esfuerzo de tracción. La importancia de estos valores es la de observar si existe alguna zona que esté fuera del esfuerzo de fluencia.

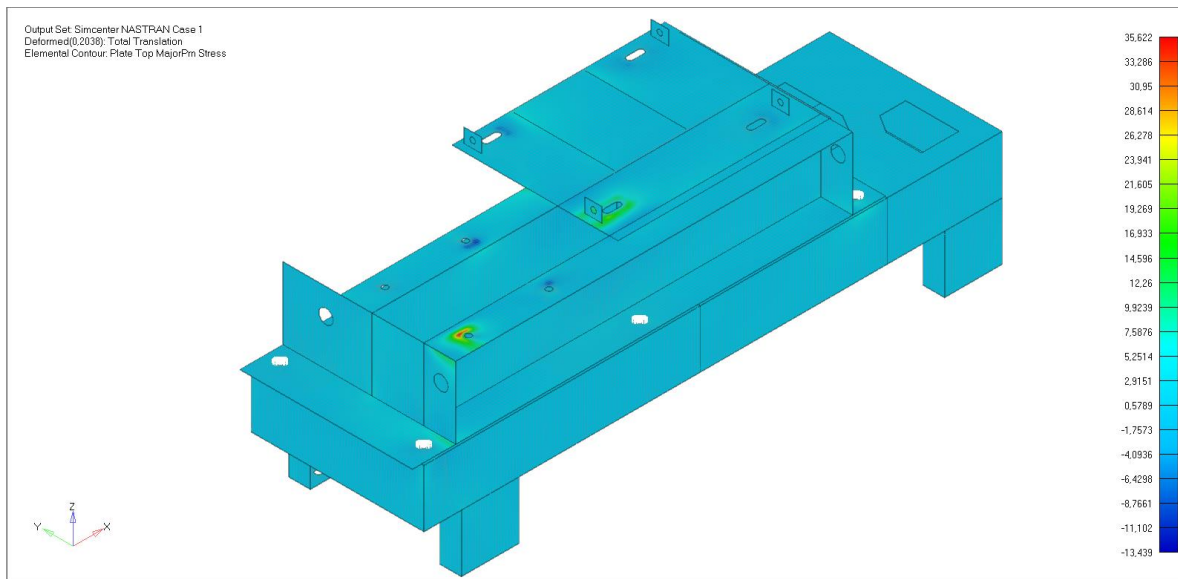


Figura 3.11: Esfuerzos de tracción en el sistema. Fuente: Elaboración propia.

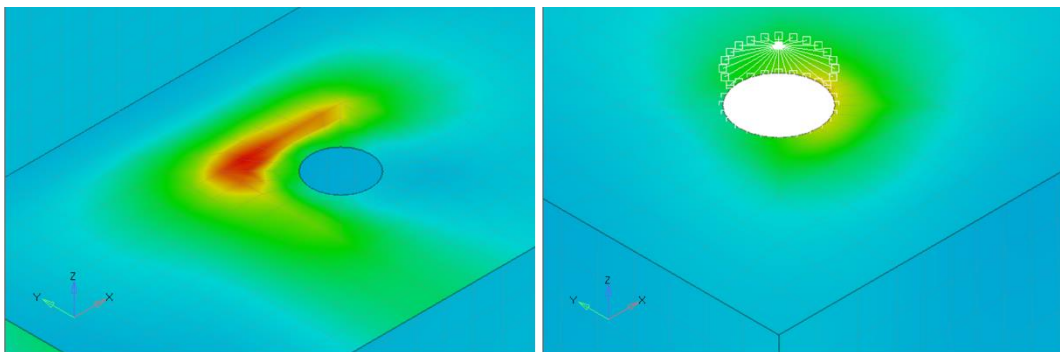


Figura 3.12: Zonas de concentración del esfuerzo. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.12 se pueden observar zonas de concentradores de esfuerzos, las cuales corresponden a zonas en donde se posicionan los pernos para asegurar los soportes del eje flotante y una zona en la base en donde se encuentra el perno que presenta un mayor esfuerzo.

A continuación, en la Figura 3.13 se presentan los resultados para esfuerzo de compresión en el sistema motriz. Se puede observar que, en la misma zona correspondiente a la posición de los pernos para asegurar los soportes del eje flotante, se encuentran los máximos esfuerzos de compresión.

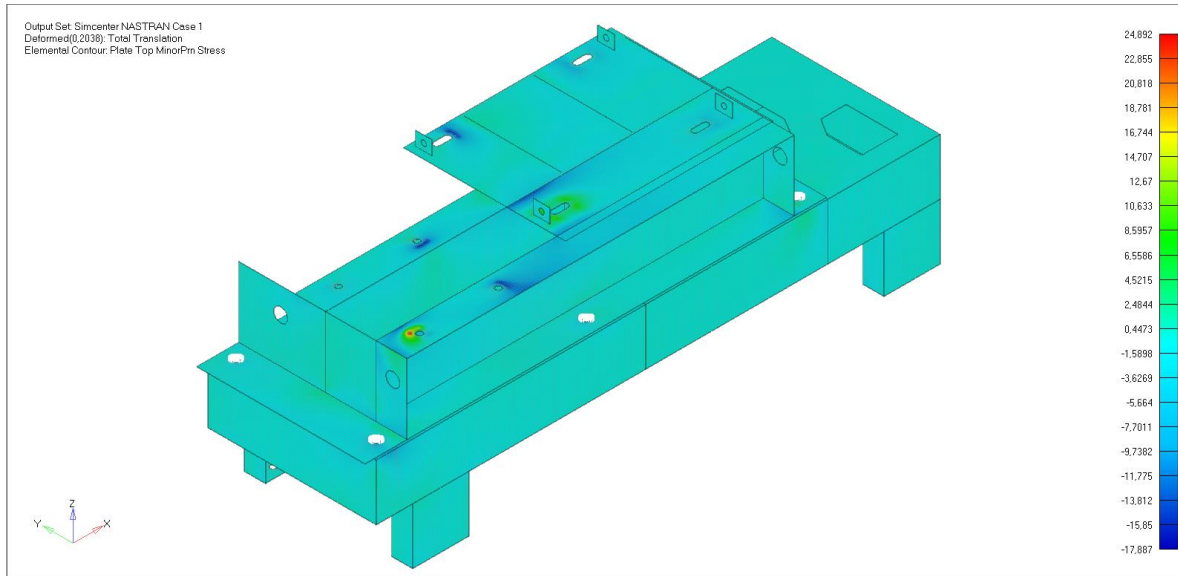


Figura 3.13: Esfuerzos de compresión de sistema motriz. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, para concluir los resultados antes mostrados, se puede mostrar el tensor de esfuerzos. Con esto se puede dar cuenta que en la zona del perno de los soportes del eje flotante se encuentra en estado de corte, ya que como se puede apreciar en la Figura 3.14, en esta zona se encuentran los máximos esfuerzos de compresión y de tracción.

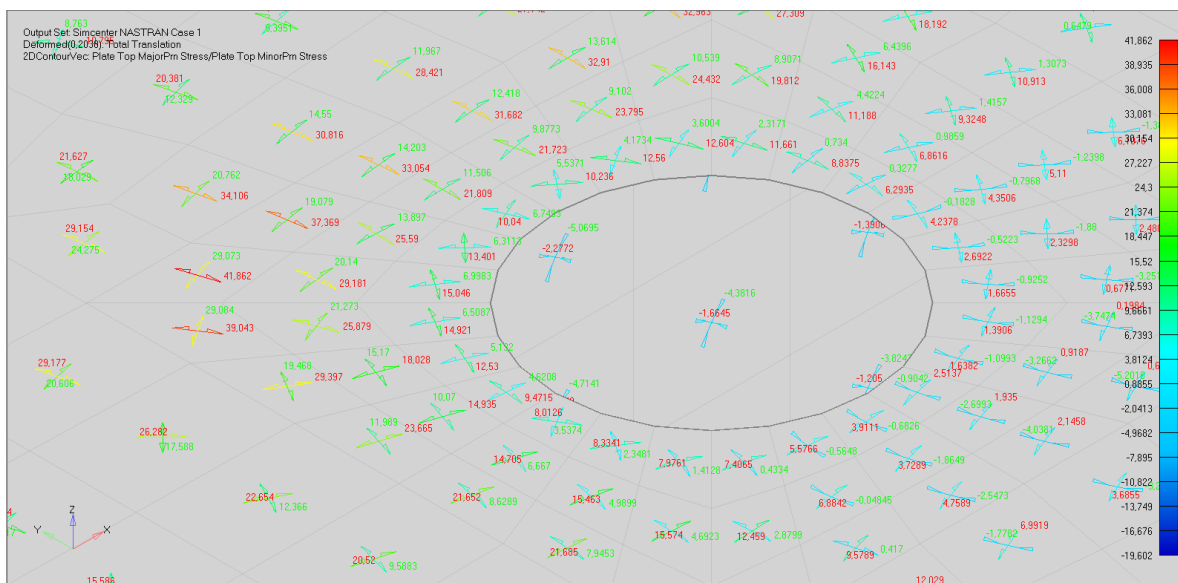


Figura 3.14: Tensor de esfuerzos en la subbase. Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Análisis estático con precarga al 70%

Para este caso se realiza una precarga de los pernos utilizando una fuerza de 110 [kN]. Esta fuerza corresponde a un 70 % de la fuerza requerida para llegar al esfuerzo de fluencia del material del perno. Esta configuración se realiza pensando en el caso ideal de sujeción que debe tener una estructura de este tipo, según el grado que tenga el perno. A partir de esto, a continuación, en la Figura 3.15 se muestran los resultados correspondientes a los esfuerzos presentes en los pernos.

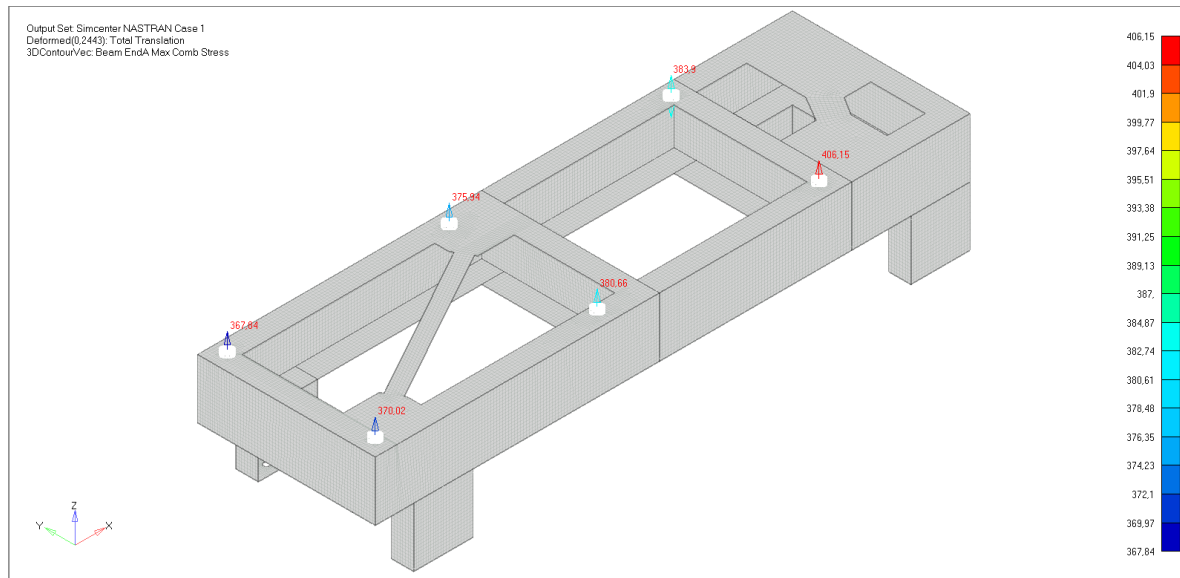


Figura 3.15: Esfuerzos de tracción en pernos pretensados. Fuente: Elaboración propia.

En la figura se puede observar que el esfuerzo aumenta considerablemente, ya que en este caso se encuentra la acción de la precarga de los pernos. Es importante mencionar que para este caso los pernos que presentan un mayor esfuerzo no son los mismos que para el caso que no presenta una precarga de estos.

Según sea el caso, solo existe un cambio relevante en el comportamiento del sistema si se modifica la precarga de los pernos. Según esto, este cambio en los esfuerzos sólo se produce en la zona que delimita a los pernos, es decir, alrededor del círculo que delimita el agujero en donde estos van posicionados. En el resto del sistema motriz el comportamiento mecánico, en lo que se refiere a esfuerzos, no varía. Es por esto por lo que, para el resto de los casos de análisis, solo se centra en mayor parte en estudiar la influencia de la precarga de pernos mostrando el comportamiento en tracción del sistema.

A continuación, en la Figura 3.16 se muestra el comportamiento en tracción del sistema motriz. Se puede observar la base ya que en esta se producen los máximos esfuerzos.

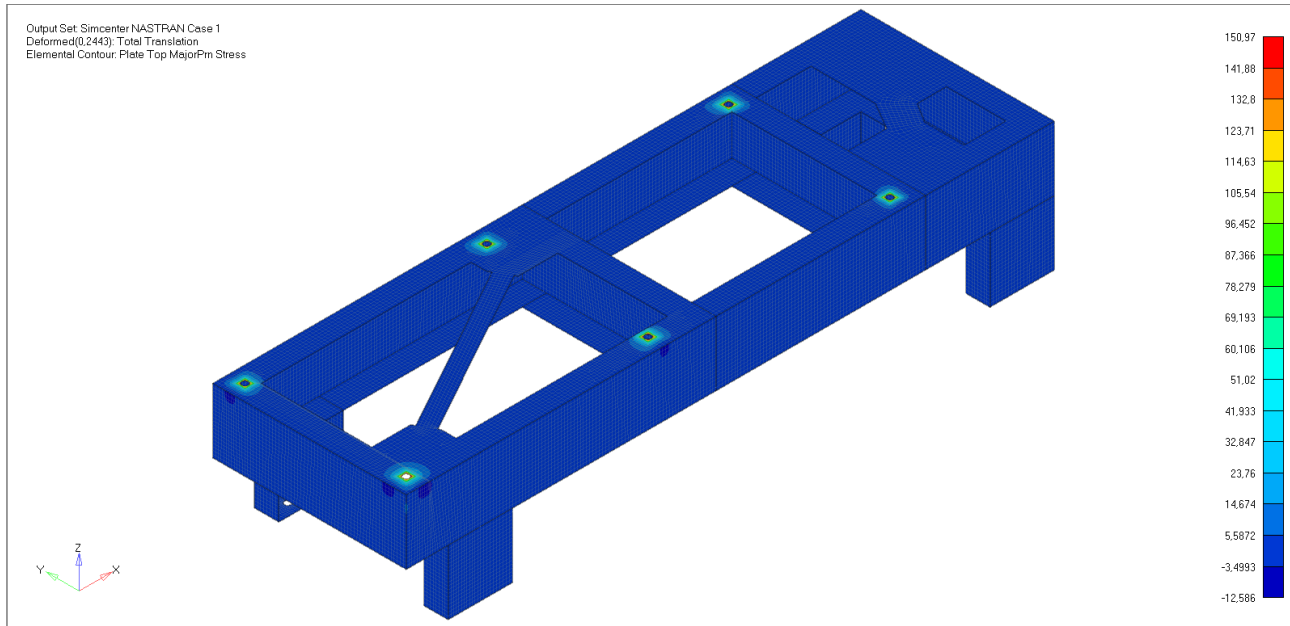


Figura 3.16: Esfuerzos de tracción en base. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el esfuerzo máximo tiene un módulo de 150.97 [MPa]. Este esfuerzo es bastante alto, tomando en consideración el esfuerzo de fluencia que posee el acero con el que está fabricada la estructura.

3.4.5 Análisis estático con soltura de tres pernos

Según se pudo observar en el análisis estático realizado sin precarga de los pernos, se pudo detectar que existen tres de estos que presentan un esfuerzo mayor, tomando en consideración solo las cargas estáticas del sistema y no la precarga. Según esto es que se aplica una precarga menor a estos tres pernos, la que equivale a la mitad de la precarga del 70%. Los otros tres pernos se mantienen con la precarga del 70%. En la Figura 3.17 se puede observar la configuración de la precarga de los pernos para este caso.

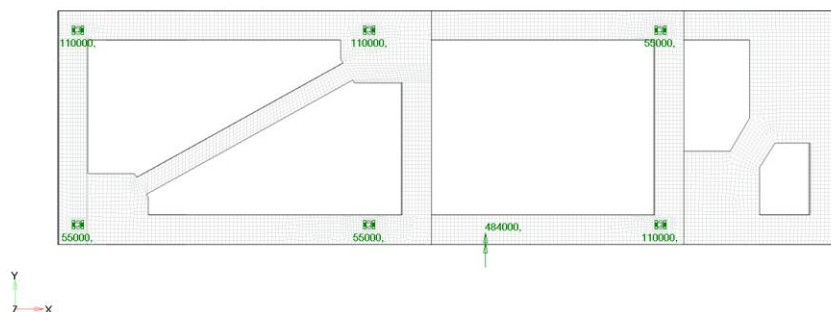


Figura 3.17: Modificación de precargas de tres pernos. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, en la Figura 3.18 se muestran los esfuerzos presentes en los pernos, según la configuración de apriete antes mostrada.

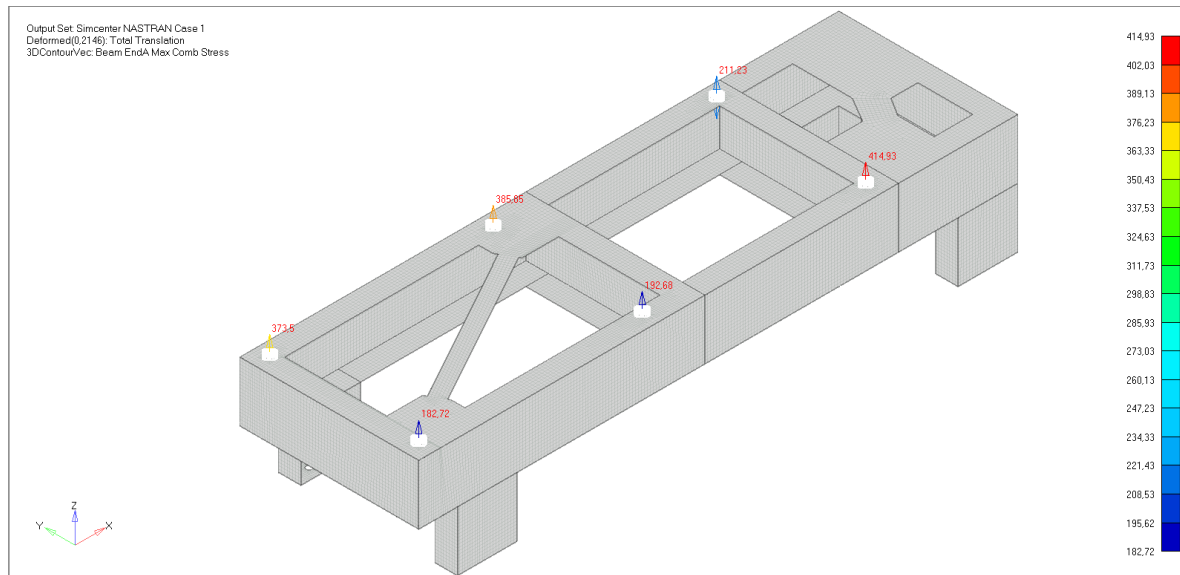


Figura 3.18: Esfuerzos en los pernos según modificación de precarga en tres de estos. Fuente: Elaboración propia.

En la figura antes mostrada se puede observar que los pernos a los que se les disminuyó la precarga presentaron una disminución de esfuerzo. Los que se mantuvieron con la precarga del 70% presentaron un aumento en el esfuerzo, llegando hasta 415 [MPa]. Este esfuerzo es bastante alto, tomando en cuenta que se considera un límite de 500 [MPa].

Luego, en la Figura 3.19 se puede observar el estado de la base en lo que se refiere al esfuerzo de tracción.

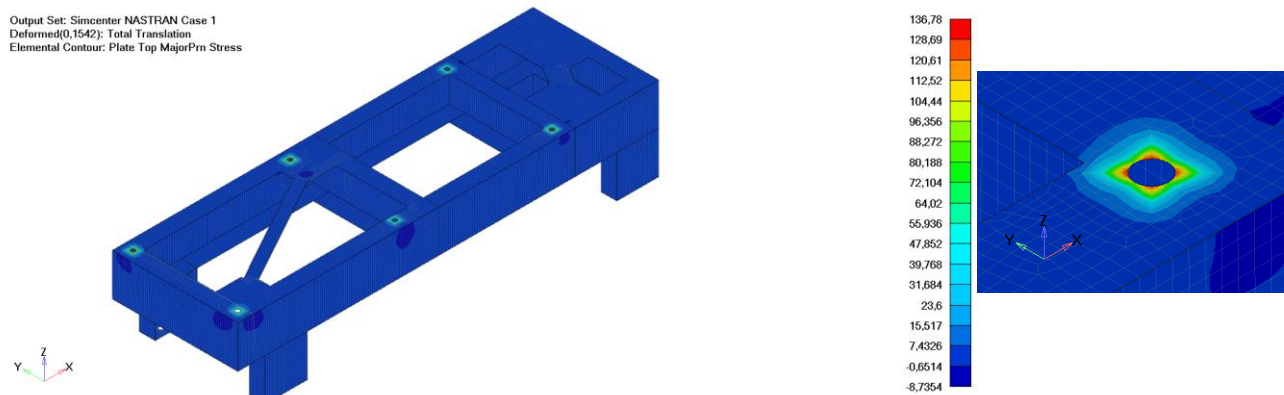


Figura 3.19: Esfuerzo de tracción en base y concentración de esfuerzo para soldadura de tres pernos. Fuente: Elaboración propia.

En la figura antes mostrada se puede observar que el esfuerzo máximo de tracción disminuye, en comparación al caso con una precarga de 70% en todos los pernos. Además, se puede observar la zona de la base en donde se encuentra posicionado el perno que presenta un esfuerzo de 415 [MPa].

3.4.6 Análisis estático con soldadura de todos los pernos

Para el caso más crítico en el que se suelten todos los pernos, es decir, se disminuya la precarga de todos estos. En la Figura 3.20 se puede apreciar la precarga que se les impone a estos, con el objetivo

de tener una condición de funcionamiento anormal y tener en cuenta las consecuencias que esto podría causar.

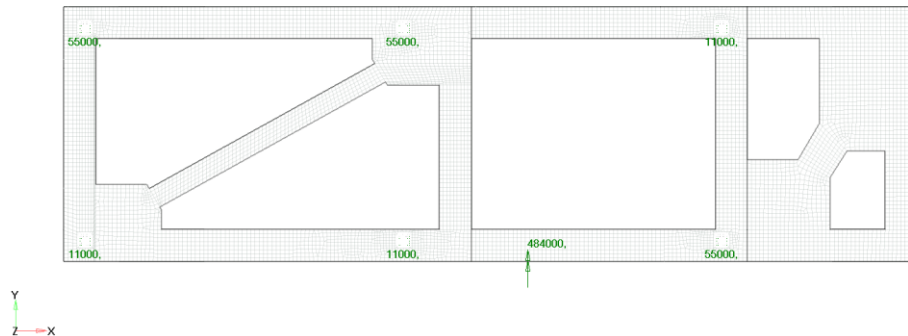


Figura 3.20: Modificación de pre carga de todos los pernos. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, se les impone una pre carga de un 50% y un 10% del apriete que poseían en un principio, el cual correspondía a 110 [kN].

A continuación, en la Figura 3.21 se puede observar el estado de esfuerzo que presentan los pernos de la estructura.

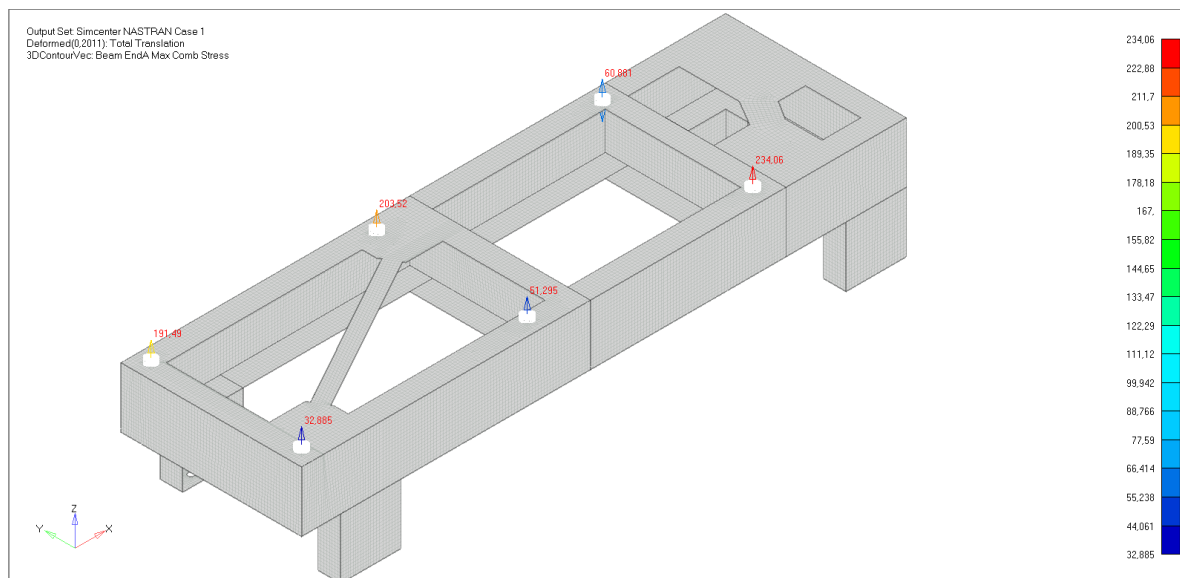


Figura 3.21: Esfuerzos en pernos con soltura de todos estos. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 3.21 que los pernos que presentan una menor pre carga presentan un esfuerzo bastante bajo en comparación al resto de los pernos. Es importante darse cuenta de que el esfuerzo mayor, el cual es de 234.1 [MPa], se presenta en el mismo perno que en el caso anterior.

Posteriormente, en la Figura 3.22 se puede mostrar el estado de la base en lo que se refiere al esfuerzo de tracción. Al igual que en el caso anterior, el mayor esfuerzo se da en la misma zona, por lo que no es necesario volver a recalcar en la imagen.

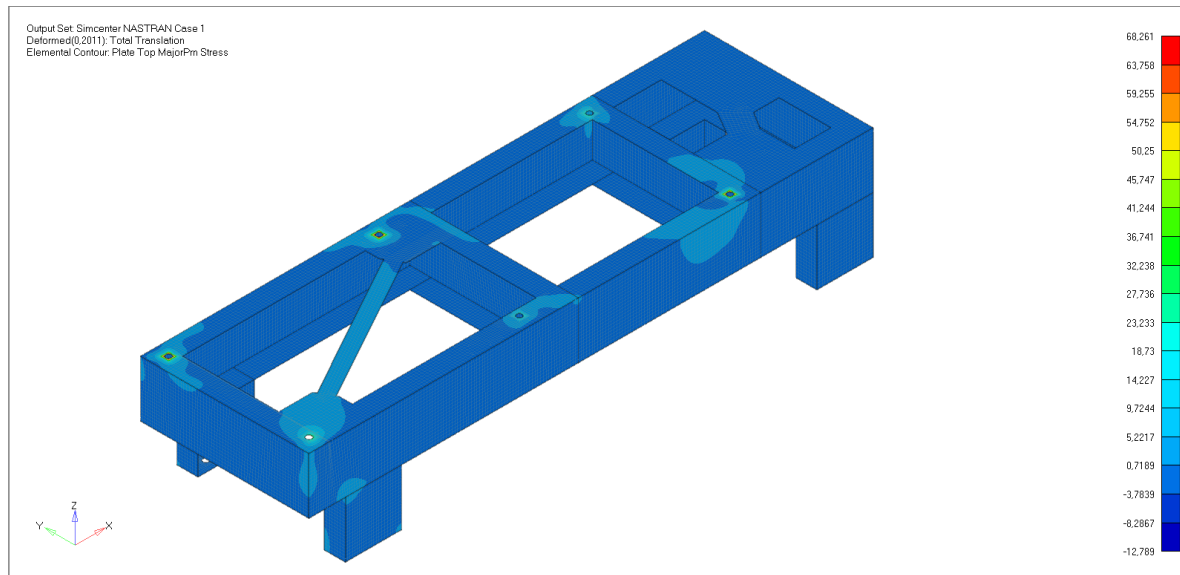


Figura 3.22: Esfuerzos de tracción en base con soltura de todos los pernos. Fuente: Elaboración propia.

3.5 Conclusión de funcionamiento del sistema

Dado los datos recopilados de los distintos análisis realizados, se puede concluir que el sistema se encuentra en resonancia, ya que los análisis modales indican que el primer modo de vibrar presenta una frecuencia bastante cercana a la frecuencia de giro de la polea conductora y el eje flotante.

Según los análisis estáticos realizados, se puede mencionar que en casos en los que se presente una soltura en los pernos de unión, se puede presentar un esfuerzo demasiado alto para aquellas uniones apernadas que no se suelten de la misma forma, es decir, para aquellas que queden soportando la mayoría de la carga que genera el sistema motriz. Por otro lado, es necesario destacar que el torque generado por el motor se considera como constante, es decir, no se consideró la partida del motor. Esto último implicaría una carga mucho mayor sobre el sistema, pero solo en un bajo rango de tiempo. Como recomendación y como posible mejora, se podría realizar un análisis de fatiga de las uniones apernadas si es que se tuviera un registro de cada cuánto tiempo se pone en funcionamiento el sistema motriz y de esta forma analizar esfuerzos alternos. Sin embargo, dado que los antecedentes no indican fracturas de los pernos, se desestimó este tipo de análisis.

Como recomendación de mejora y dado los análisis realizados, se piensa que sería necesario aumentar el área de contacto que generan los pernos de unión sobre los perfiles de la base y la subbase. Esto con el fin de evitar localizaciones de los esfuerzos en zonas que estarían propensas a agrietarse, además de recomendar la implementación de pletinas entre ambas estructuras, bajo el principio antes mencionado.

CAPÍTULO 4: Planteamiento de solución del problema

Para poder dar una solución al problema que presenta este sistema motriz (145-SN-009-010), es necesario plantear un rediseño de la estructura. En este caso en particular, lo que se pretende hacer es rigidizar la estructura. Para conseguir esto, es necesario aplicar más pernos en la unión entre la subbase y la base. Esto según el análisis modal realizado, ya que se muestra una condición de resonancia y según los análisis estáticos, es importante subdividir la carga que tienen los pernos, dado que se presenta una soltura de estos, según los antecedentes del problema. También es importante recalcar que algunos de estos pernos presentaron esfuerzos bastante altos, según los resultados de las simulaciones del funcionamiento del sistema motriz.

Por otro lado, el componente más pesado que tiene este sistema motriz es el motor. Este componente presenta unas placas de refuerzo que no están posicionadas exactamente en la zona de anclaje del motor. Es por esto por lo que también es importante reforzar esta zona de la estructura, adicionando placas en las zonas de anclaje.

Según los análisis realizados, se puede observar que las zonas en las que presentan los esfuerzos más altos son las zonas circundantes a los agujeros de los pernos. La solución que se considera para poder contrarrestar esta situación es la de añadirle más nodos a los nodos spider que definen a los pernos. Esto con el objetivo de simular la presencia de arandelas y aumentar el área con la que se definen los pernos en los nodos spider. Con esto lo que se busca es distribuir la carga que generan los pernos sobre las placas que se mantienen en contacto. En la Figura 4.1 se puede apreciar cómo se ven los elementos que simulan los pernos con los nodos adicionales.

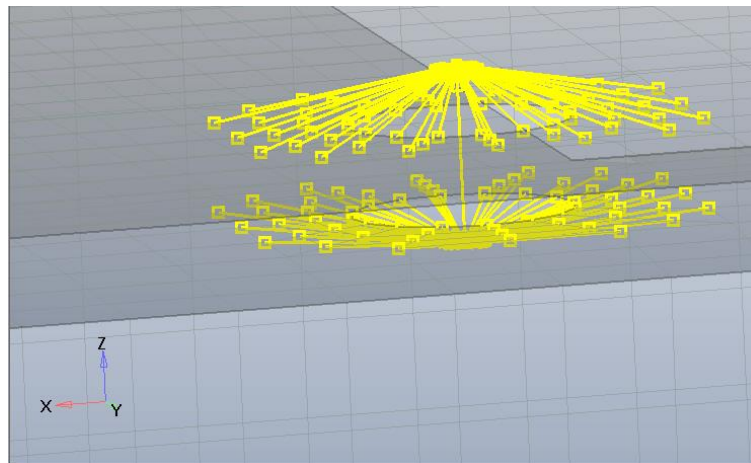


Figura 4.1: Nodos agregados a los nodos spider. Fuente: Elaboración propia.

4.1 Consideraciones para realizar modificaciones.

Según los análisis hechos para determinar la condición de funcionamiento del sistema, se concluye que es necesario aumentar la frecuencia natural del sistema, con el fin de alejarse de la frecuencia de giro del eje flotante y la polea conducida, pero no lo suficientemente alta como para acercarse a la frecuencia de giro del motor y de la polea conductora. Para aumentar la frecuencia natural (w_n) del sistema es necesario rigidizar el sistema, con el objetivo de aumentar el factor k , ya que, aumentando este factor, aumenta w_n . Esto se puede visualizar en la ecuación (8).

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

La decisión de poner más pernos para rigidizar la estructura se basa en la forma en la que vibra el sistema según la primera frecuencia natural. Como se puede apreciar en la Figura 4.2, se observa el movimiento amplificado por 100, que presenta la sub-base del sistema según su posición original, la cual está destacada en azul. Se puede observar que en la zona en donde se ubica el motor, en la subbase, se presenta un movimiento que no es el más apropiado, ya que el objetivo de esta unión es que sea lo más rígida posible. Es por esto por lo que es importante adicionar pernos en esta zona, con el objetivo de restringir el movimiento que genera la vibración del sistema, según su primera frecuencia natural. Además, se debe tener en cuenta que el número de solo seis pernos para unir esta estructura es bastante bajo, teniendo en cuenta que los componentes de la subbase suman un peso de 1155.52 [kg]. Esto, corroborado con los análisis estáticos realizados en apartados anteriores.

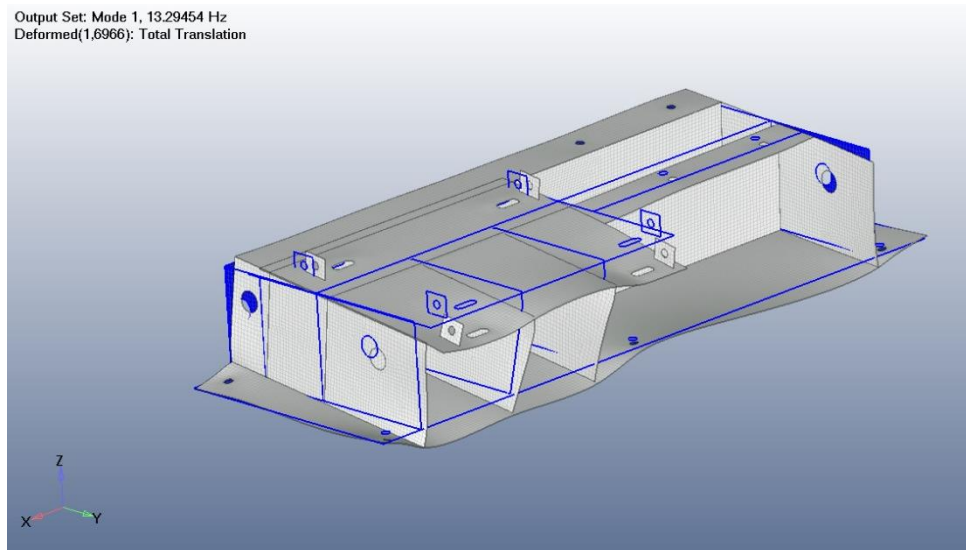


Figura 4.2: Vibración según primera frecuencia natural. Fuente: Elaboración propia.

Dado que el motor es el componente más pesado de la estructura, es que se vuelve importante reforzar esta zona. Además, las placas de refuerzo no se encuentran precisamente en las zonas del anclaje del motor. Por otro lado, en esta misma zona, en la placa en la que se encuentra montado el motor, se puede apreciar que se deforma, debido al peso del motor. Según lo antes mencionado, es preciso poner placas de refuerzo desde la placa que soporta el motor y la zona en donde se unen la base y la subbase. Esto aumenta aún más la rigidez de la estructura y también refuerza una zona crítica del sistema motriz, ya que aquí se encuentra el componente más pesado, el cual genera una gran sollicitación en la estructura debido al torque que este produce.

4.2 Modificaciones estructurales del sistema motriz

4.2.1 Aumento en el número de pernos

Con el objetivo de reforzar la estructura, es que se adicionan ocho pernos además de los que posee el sistema motriz en esta zona de unión. Estos se ubican a distancias iguales con respecto a los pernos que posee el sistema originalmente, es decir, se realizaron dos agujeros entre cada agujero existente. En la Figura 4.3 se puede apreciar los agujeros en donde están ubicadas estas uniones apernadas.

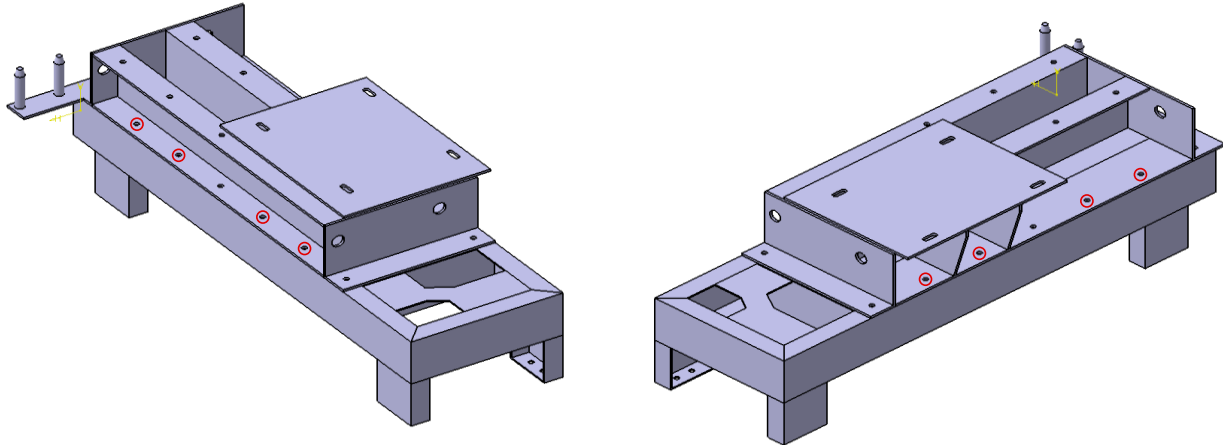


Figura 4.3: Disposición de agujeros según la modificación. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Ubicación y geometría de placas de refuerzo

Para reforzar la zona referente a la ubicación del motor, es que diseñan tres placas para ser ubicadas en zonas estratégicas. El objetivo es evitar la deflexión de la placa en la que se encuentra montado el motor. Según esto, como se puede apreciar en la Figura 4.4, en color amarillo se muestran las placas adicionales y las distancias con respecto a las estructuras existentes, las cuales están en color verde.

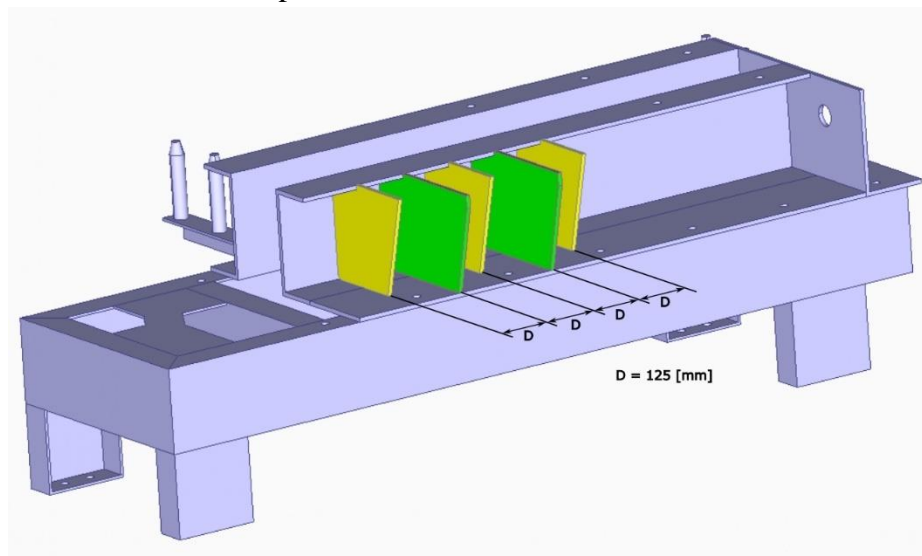


Figura 4.4: Posición de placas de refuerzo. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 4.4 que se quitaron dos estructuras para poder mostrar claramente la disposición de las placas de refuerzo. Los planos de montaje de estas placas, su geometría y la disposición específica de los agujeros realizados se muestran en anexos A.2.

CAPÍTULO 5: Resultados

5.1 Resultados de modificaciones sistema motriz 145-SN-009-010

Según a las modificaciones mencionadas anteriormente, es que se realizan simulaciones para poner a prueba las modificaciones planteadas. Estas simulaciones corresponden a análisis modales y análisis estáticos. Dentro de este último, se estudia el comportamiento que presentan los pernos, y la estructura en general, además de observar el tensor de esfuerzos.

5.1.1 Resultados análisis modal

Como se menciona en apartados anteriores, lo que se busca es alejar las frecuencias de los modos de vibrar de las frecuencias de giro del motor y del eje flotante. Como resultado de las simulaciones con las modificaciones realizadas, se muestran en la Tabla 5.1 los primeros modos de vibrar junto con los porcentajes de masa efectiva.

Tabla 5.1: Resultados del análisis modal para las modificaciones

Modo	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [CPM]	M _x	M _y	M _z	φ _x	φ _y	φ _z
1	18.12	1087	0.05%	60.34%	1.90%	72.67%	1.96%	52.02%
2	36.83	2210	51.98%	0.32%	12.38%	1.48%	59.86%	0.26%
3	40.25	2415	1.78%	2.68%	60.47%	21.18%	28.60%	0.80%
4	52.19	3132	13.09%	3.30%	17.72%	1.64%	6.22%	8.95%
5	66.27	3976	0.13%	30.55%	4.47%	1.83%	1.23%	12.35%
6	86.89	5213	0.95%	0.00%	0.44%	0.07%	0.00%	1.96%
7	100.72	6043	0.95%	1.85%	0.01%	0.01%	0.16%	16.64%
8	118.24	7095	4.51%	0.11%	0.01%	0.01%	0.00%	0.70%
9	143.55	8613	0.10%	0.01%	0.28%	0.06%	0.00%	0.01%
10	154.6	9276	0.97%	0.07%	0.50%	0.08%	0.00%	0.79%
11	170.19	10212	0.23%	0.00%	0.23%	0.05%	0.70%	0.04%
12	172.78	10367	23.03%	0.09%	0.39%	0.11%	0.03%	4.57%
13	180.05	10803	0.06%	0.01%	0.23%	0.15%	0.00%	0.19%
14	218.82	13129	0.01%	0.04%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%
15	232.53	13952	0.26%	0.57%	0.01%	0.32%	0.03%	0.00%
16	266.23	15974	1.27%	0.01%	0.15%	0.18%	0.14%	0.56%
17	269.86	16191	0.06%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.02%
18	286.04	17162	0.26%	0.00%	0.42%	0.01%	0.53%	0.10%
19	296.08	17765	0.28%	0.02%	0.24%	0.00%	0.43%	0.01%
20	302.03	18122	0.02%	0.01%	0.12%	0.11%	0.11%	0.03%

En este primer punto de los análisis, lo que se busca es obtener modos de vibrar que se mantuvieran alejados de las frecuencias críticas que pudieran causar resonancia. Estas frecuencias corresponden a la frecuencia de giro del motor junto con la polea conductora (24.6 [Hz]) y la frecuencia del eje flotante junto con la polea conducida (13.4 [Hz]). Como se puede observar en la Tabla 5.1 los primeros de vibrar (modo 1 y 2) se encuentran alejados de las frecuencias críticas con las que trabaja el sistema

motriz. Esto indica que las modificaciones realizadas efectivamente rigidizan la estructura, permitiendo que se evite que el sistema entre en resonancia y ponga en riesgo la integridad de componentes motrices y estructurales. Para explicar claramente los valores de frecuencias a evitar y la frecuencia obtenida, se muestra en la Figura 5.1 una gráfica con los valores a evitar junto con los obtenidos de los análisis para el diseño propuesto.

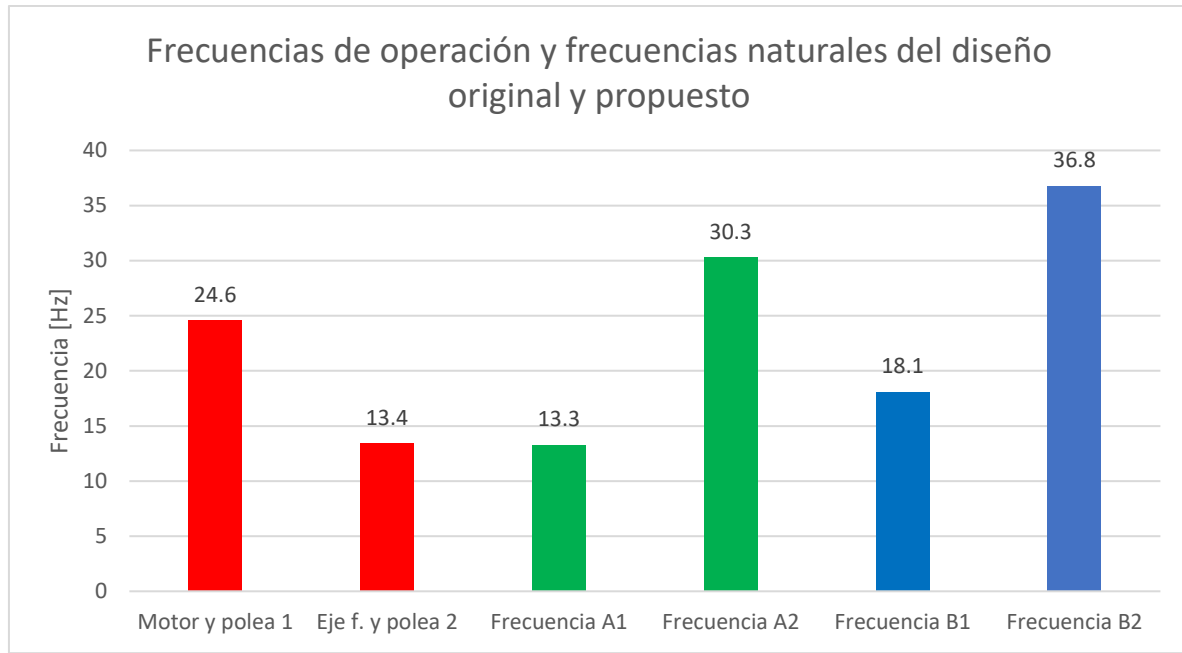


Figura 5.1: Gráfica con frecuencias de operación y frecuencias naturales. Figura: Elaboración propia.

En la figura anterior se pueden observar en color rojo las frecuencias de operación del sistema motriz, en donde la polea 1 corresponde a la polea conductora y la polea 2 corresponde a la polea conducida. En verde están las primeras dos frecuencias naturales presentes en el diseño original, siendo A1 y A2 la primera y segunda frecuencia natural respectivamente. En azul las primeras dos frecuencias naturales de la simulación del diseño propuesto, donde B1 y B2 representan la primera y segunda frecuencia natural respectivamente.

5.1.2 Resultados análisis estáticos

Tomando en cuenta que las placas de refuerzo presentan el mismo espesor que las placas preexistentes y que los agujeros adicionales son iguales en su geometría a los originales, se realiza la simulación con una precarga del 70% de la fuerza requerida para llegar al esfuerzo de fluencia del material (110 [kN]), según una referencia de 500 [MPa] como esfuerzo de fluencia. Esta simulación lo que pretende es obtener el estado de esfuerzos de toda la estructura y de sus partes más importantes, poniendo énfasis en las zonas estudiadas a partir del comportamiento en su funcionamiento original.

A partir del análisis estático, se estudia el comportamiento de los pernos. En la Figura 5.2 se pueden observar los esfuerzos en tracción a los que estos se encuentran sometidos, según los resultados de la simulación.

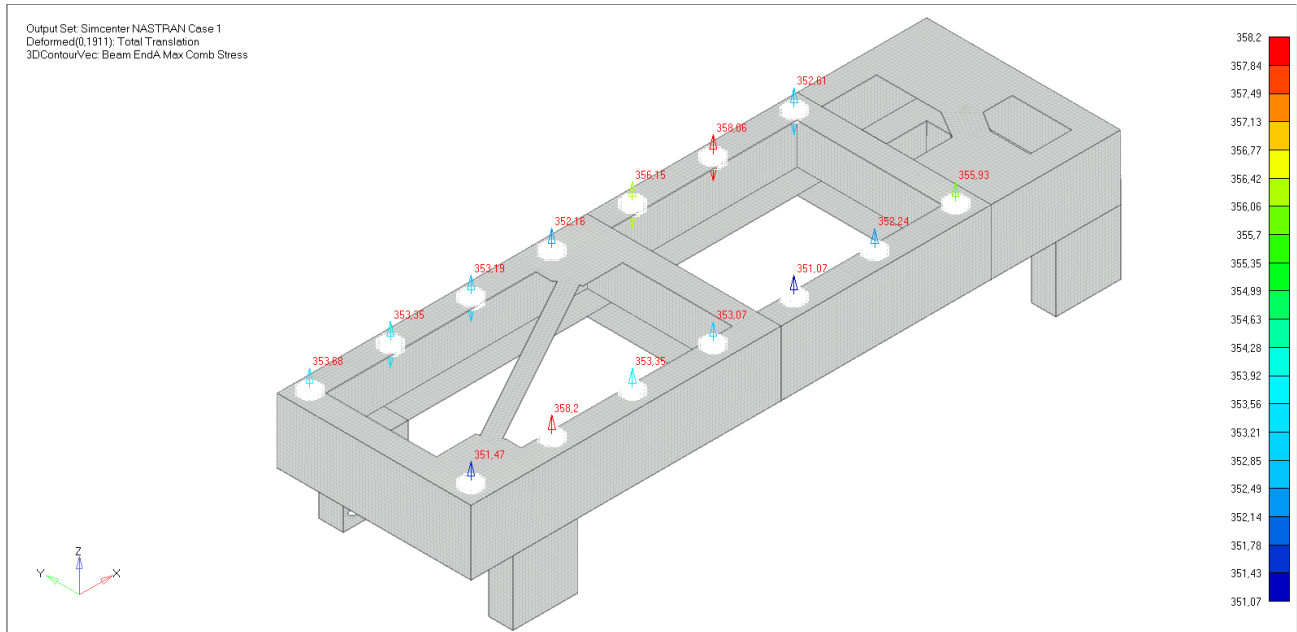


Figura 5.2: Esfuerzos de tracción presentes en los pernos de la estructura modificada. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, los esfuerzos en cada perno no varían demasiado, lo cual implica que la carga que estos reciben es similar, al redistribuirse de manera más equitativa las fuerzas que genera el sistema motriz. Esto señala que el sistema se comporta de manera estable, además de que el esfuerzo máximo en este caso es alrededor de 50 [MPa] más bajo que el esfuerzo máximo presente en el análisis estático realizado para determinar el estado de esfuerzo de los pernos en su régimen de funcionamiento.

Otro punto relevante es observar el comportamiento estructural del sistema en lo que se refiere a las zonas circundantes a las uniones apernadas. Como se puede ver cuando se estudia el estado de esfuerzos presente en el régimen de funcionamiento, estas zonas eran las más críticas. Según esto en la Figura 5.3, se pueden observar los esfuerzos en tracción de la estructura.

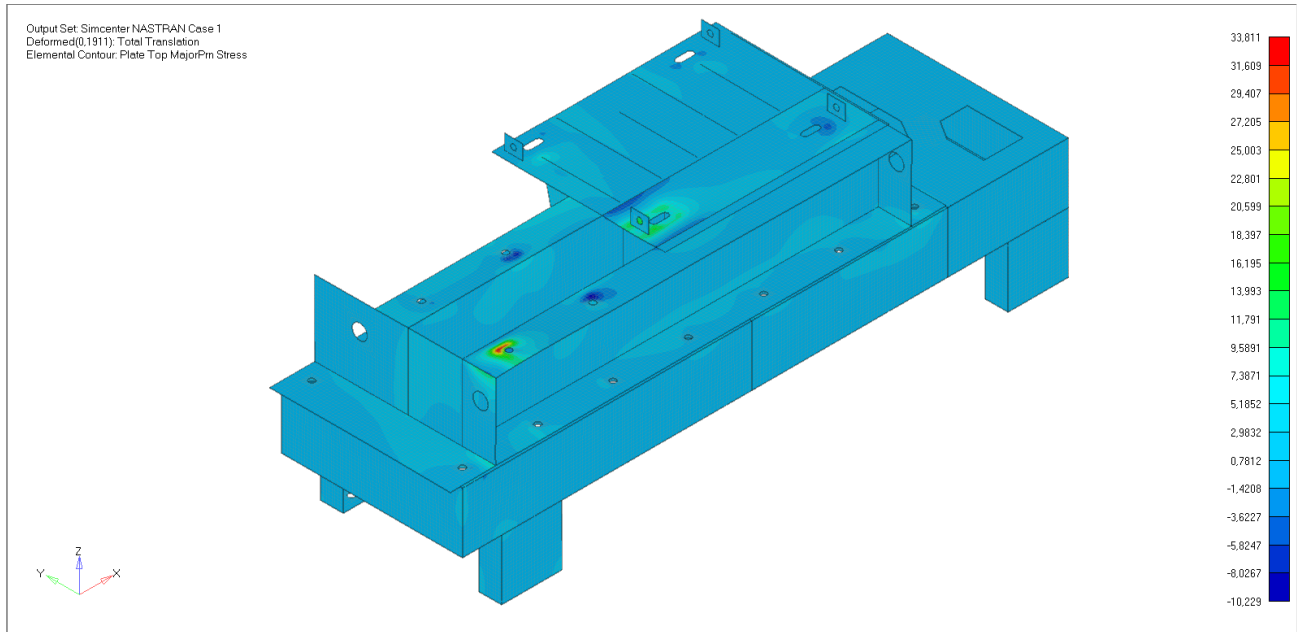


Figura 5.3: Esfuerzos de tracción de la estructura modificada. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5.3 se puede observar que los esfuerzos máximos se dan en la zona de anclaje del eje flotante. Se debe tener en consideración la carga debida a la tensión de la polea, la cual es la causante de esta condición. Es importante recalcar que en este caso las zonas circundantes a los agujeros de las uniones apernadas ya no se presentan como zonas críticas, en donde se encuentren concentradores de esfuerzos. Es por esto por lo que se vuelve importante recalcar la importancia de hacer una correcta simulación de las uniones apernadas y considerar las zonas referentes a las arandelas.

Finalmente, con el objetivo de poder tener una vista generalizada del comportamiento de la estructura, en la Figura 5.4 se muestra el tensor de esfuerzos de la zona referente a la posición del anclaje del eje flotante.

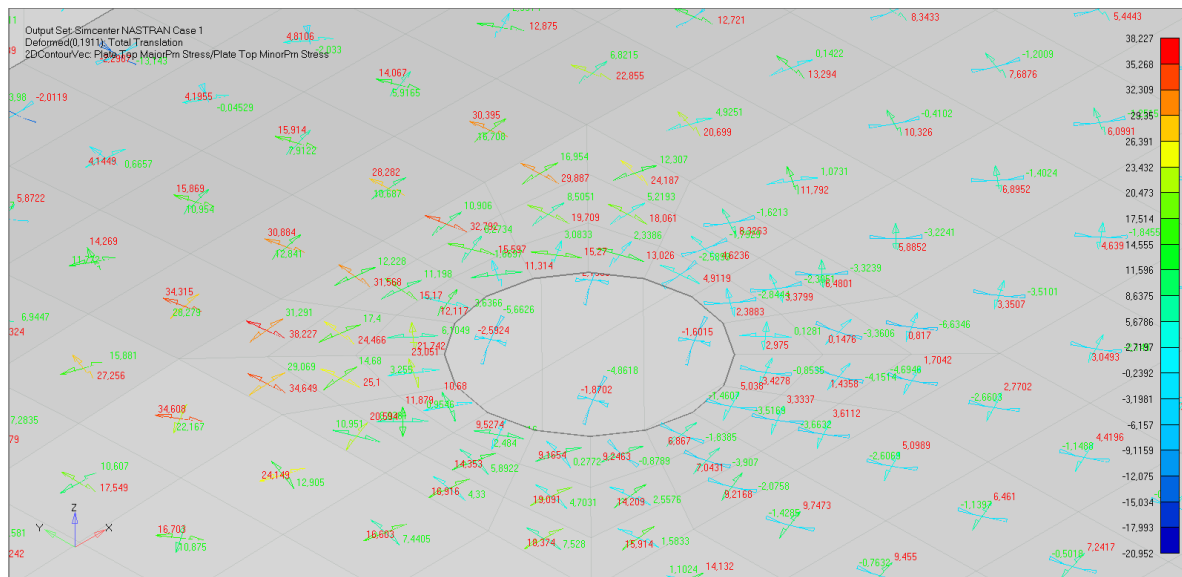


Figura 5.4: Tensor de esfuerzos en zona de anclaje del eje flotante. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 5.4 y para concluir los resultados mostrados, la zona referente a uno de los pernos del soporte del eje flotante se encuentra en estado de corte. Esto según lo que se puede observar según el estado de esfuerzos presentes en el tensor, ya que al igual que en el análisis para determinar las solicitaciones presentes en el funcionamiento del sistema motriz sin las modificaciones, en esta oportunidad se presenta una condición similar.

CAPÍTULO 6: Conclusión

Como se menciona en el primer capítulo, el movimiento del harnero vibratorio se basa en el giro de masas desbalanceadas para generar el movimiento vibratorio. Este movimiento genera fuerzas bastante grandes, lo que implica que parte de estas fuerzas se transmitan hacia el sistema motriz. Esto sin duda genera una condición que provoca la soltura de los pernos de unión entre la subbase y la base del sistema motriz. Por otro lado, se tiene que el sistema por sí solo, dado un deficiente diseño, se encuentra en estado de resonancia, provocando la soltura de pernos. Esto significa que el diseño de las uniones apernadas es deficiente, ya que no se tiene la rigidez necesaria.

La solución planteada se basa en aumentar los puntos de unión, en lo que se refiere en aumentar el número de pernos y soldar placas para aumentar la rigidez y dar soporte al componente más pesado del sistema motriz. Esta propuesta de modificación según las simulaciones realizadas provoca que el sistema aumente su rigidez generando un aumento en su frecuencia natural, evitando que este entre en zonas resonantes. Según esto, el aumento en la frecuencia natural es de aproximadamente de un 36% en lo que se refiere a la primera frecuencia natural del modelo original con respecto a la primera frecuencia natural del modelo con modificaciones. Como se puede observar en la Figura 5.1 se muestran las frecuencias que representan las zonas críticas que podrían producir resonancia y las frecuencias obtenidas de los análisis.

La propuesta de modificación generada para el sistema motriz 145-SN-009-010 fue aprobada por la compañía y ya se encuentra en un proceso de fabricación para que el equipo de confiabilidad pueda implementar las mejoras.



Bibliografía







- [1] Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad. (s/f). Iberisa.com. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>
- [2] Análisis Dinámico de Respuesta Transitoria Modal Lineal de una Tubería (SOL112) con FEMAP & NX NASTRAN. (s/f). Iberisa.com. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <http://www.iberisa.com/soporte/femap/dinamico/tuberia.htm>
- [3] de Elementos Finitos, 2. 1. Introducción al Método. (s/f). *PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS Y DESCRIPCIÓN DE ALGOR FEA*. Udlap.mx. Recuperado el 5 de abril de 2023, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf
- [4] Fuchs, H. O., & Stephens, R. I. (1980). *Metal Fatigue in Engineering*. John Wiley & Sons.
- [5] *Crushing and screening handbook*. (s/f). Metso Outotec. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <https://www.mogroup.com/insights/e-books/crushing-and-screening-handbook/>
- [6] División Gabriela Mistral. (s/f). Codelco.com. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <https://www.codelco.com/operaciones/gabriela-mistral/division-gabriela-mistral>
- [7] Celigüeta-Lizarza, J. T. (juan T. (2011). Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural. Recuperado el 20 de abril de 2023, de <https://dadun.unav.edu/handle/10171/19069>
- [8] de los elementos finitos., 2. 1. Introducción al Método. (s/f). *PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS*. Udlap.mx. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/maldonado_j_r/capitulo2.pdf
- [9] (S/f). Udlap.mx. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_sa_ja/capitulo3.pdf
- [10] Por, G., & Dli, A. (s/f). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Termogram.com. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://termogram.com/images/pdf/analisis-vibraciones/introduccion-al-analisis-de-vibraciones-azima-dli.pdf>
- [11] Jesús. (2021, mayo 10). *El análisis modal: concepto, utilidad y ejemplo*. DPO FLUID. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://dpofluid.com/proyectos/analisis-modal-concepto-utilidad-y-ejemplo/>
- [12] (iberisa), B. M. (2019, septiembre 15). • Tornillos Sólidos Pretensados con SOL101. Femap y Simcenter Nastran. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://iberisa.wordpress.com/2019/09/15/tornillos-pretensados-con-elementos-solidos-chexa/>
- [13] (iberisa), B. M. (2020, septiembre 11). • frequency response (SOL111) with BOLT preload and contact in FEMAP and simcenter nastran. Femap y Simcenter Nastran. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://iberisa.wordpress.com/2020/09/11/frequency-response-sol111-with-bolt-preload-and-contact-in-femap-and-simcenter-nastran/>

- [14] CODELCO - Corporación Nacional del Cobre. (n.d.). División Gabriela Mistral. CODELCO - Corporación Nacional del Cobre, Chile. Recuperado el 5 de agosto 2023, de <https://www.codelco.com/operaciones/gabriela-mistral/division-gabriela-mistral>
- [15] Merino, M., & Alonso, M. (2017). Modelación dinámica no lineal de harnero vibratorio considerando inercia del mineral y fuerza del mineral sobre el harnero calculada con elementos discretos. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/2656>
- [16] Navarro, N., & Eduardo, C. (2015). ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE HARNERO VIBRATORIO TYLER 10' x 20', USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/56203?show=full>
- [17] Robert L. Norton, (2011). Diseño de máquinas y mecanismos. (7 ed.). Pearson.

ANEXOS

A.1 Planos sistema motriz 145-SN-009-010

PLANO PROPIEDAD CODELCO

PARA APLICACIÓN

NO APTO PARA FABRICACIÓN

COPIA NO CONTROLADA

NOTAS:

- 1- TODAS LAS MEDIDAS INDICADAS EN MM (B.I.C.)
- 2- TODAS LAS PIEZAS DEBEN LIMPIARSE DE ACEITES E IMPUREZAS ANTES DE SOLDAR
- 3- MATERIALES PERFILES ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36
- 4- SOLDADURA SEGUN AWS E6010 - E7018
- 5- APLICAR UNA CAPA ANTICORROSIVO EPOXICA COLOR ROJO
- 6- TERMINACION PINTURA 1 CAPA EPOXICA RAL 1015

LISTADO DE MATERIALES		MATERIA		LARGO(mm)		PESO(kg)	
ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIA	AREA(m ²)	UNIDAD	TOTAL	TOTAL
1	1	MESA PARA HARNEROS 145-SN-009-010					
2	1	CANAL C 200X750	A-37	588 mm	91	182	
3	1	CANAL C 200X750	A-37	600 mm	93	186	
4	1	CANAL C 200X750	A-37	1300 mm	216	436	
5	1	PANGULO 150X75	A-37	200 mm	31	124	
6	1	PL-6	A-36	0.14 m ²	67	67	
7	1	PL-7	A-36	0.016 m ²	076	076	
8	1	PL-8	A-36	0.017 m ²	081	081	
PESO TOTAL:						1035	5kg

SALFAMANTENCIONES

SERVICIO DE MANTENIMIENTO GENERAL AREA CHANCADO, DGM.

DEPARTAMENTO MEJORAMIENTO CONTINUO 10024431HMEC-160-ME-PL-007-1

AREA OPERACION: CHANCADO

TITULO DEL PLANO

FABRICACION DE MESA HARNEROS 145-SN-009-010

Nro.	REVISO	FECHA	DESCRIPCIÓN	NOMBRE	FIRMA	FECHA
0	A		EMITIDO P/REVISIÓN INTER.	O.BARRAZA		22/07/22
			EMITIDO P/FABRICACIÓN.	O.BARRAZA		22/07/22
				J.COSTERNA		22/07/22
				J.COSTERNA		22/07/22
				A.ARMENAKIS		22/07/22




GABRIELA MISTRAL



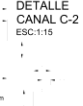

REFERENCIA: NUMERO DE CONTRATO: 460021949

ESCALA: 1:15-1:14 LAMINA: 01 - 04

FORMATO: A3

REVISIÓN: 0

PLANO PROPIEDAD CODELCO

PARA APLICACIÓN

NO APTO PARA FABRICACIÓN

NOTAS:

- 1- TODAS LAS MEDIDAS INDICADAS EN MM (B.I.C.)
- 2- TODAS LAS PIEZAS DEBEN LIMPIARSE DE ACEITES E IMPUREZAS ANTES DE SOLDAR
- 3- MATERIALES PERFILES ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36
- 4- SOLDADURA SEGUN AWS E6010 - E7018
- 5- APLICAR UNA CAPA ANTICORROSIVO EPOXICA COLOR ROJO
- 6- TERMINACION PINTURA 1 CAPA EPOXICA RAL 1015

LISTADO DE MATERIALES		MATERIA		LARGO(mm)		PESO(kg)	
ITEM	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIA	AREA(m ²)	UNIDAD	TOTAL	TOTAL
1	1	SOPORTE MOTOR Y EJE CARDANICO PARA HARNEROS 145-SN-009-010					
2	1	CANAL C 200X1100	A-37	1300 mm	240	240	
3	1	PANGULO 200X100	A-37	835 mm	154	154	
4	1	PANGULO 200X100	A-37	600 mm	111	111	
5	1	PANGULO 400X100	A-37	350 mm	25	25	
PESO TOTAL:						77	0kg

SALFAMANTENCIONES

SERVICIO DE MANTENIMIENTO GENERAL AREA CHANCADO, DGM.

DEPARTAMENTO MEJORAMIENTO CONTINUO 10024431HMEC-160-ME-PL-007-2

AREA OPERACION: CHANCADO

TITULO DEL PLANO

FABRICACION DE SOPORTE MOTOR Y EJE CARDANICOS HARNEROS 145-SN-009-010

Nro.	REVISO	FECHA	DESCRIPCIÓN	NOMBRE	FIRMA	FECHA
0	A		EMITIDO P/REVISIÓN INTER.	O.BARRAZA		22/07/22
			EMITIDO P/FABRICACIÓN.	O.BARRAZA		22/07/22
				J.COSTERNA		22/07/22
				J.COSTERNA		22/07/22
				A.ARMENAKIS		22/07/22

GABRIELA MISTRAL

REFERENCIA: NUMERO DE CONTRATO: 460021949

ESCALA: 1:14-1:15 LAMINA: 02 - 04

FORMATO: A3

REVISIÓN: 0

DETALLE ANGULO PA-6
ESC:1:15

DETALLE PLANCHA PL-7
ESC:1:15

DETALLE PLANCHA PL-8
ESC:1:15

DETALLE BARRA B-11
ESC:1:15

DETALLE PLANCHA PL-9
ESC:1:15

DETALLE PLACA P-10
ESC:1:15

NOTAS:

- 1.- TODAS LAS MEDIDAS INDICADAS EN mm (S.I.C.)
- 2.- TODAS LAS PIEZAS DEBEN IMPARSE DE ACEITES E IMPUREZAS ANTES DE SOLDAR.
- 3.- MATERIALES PERFILES ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36
- 4.- SOLDADURA SEGUN AWS E6010 - E7018
- 5.- APLICAR UNA CAPA ANTICORROSIVO EPOXICA COLOR ROJO
- 6.- TERMINACION PINTURA: 1 CAPA EPOXICA RAL 1015

LISTADO DE MATERIALES

ITEM	CANTIDAD UNID. TOTAL	MARCA	DESCRIPCION	MATERIA	LARGO(mm)	ANCHO(mm)	PESO(kg)
SOPORTE MOTOR Y EJE CARDANICO PARA HARNEROS 145-SN-009-010							
6	1	PA-6	ANGULO 60X60X6	A-37	335	mm	1.47
7	1	PL-7	PLANCHAS 740X577X10	A-37	0.47	m ²	33.6
8	1	PL-8	PLANCHAS 1380X200X10	A-37	0.27	m ²	21.6
9	1	PL-9	PLANCHAS 357X240X10	A-37	0.089	m ²	6.8
10	1	P-10	PLACA 60X60X10	A-37	0.03	m ²	0.28
11	1	B-11	BARRA REDONDA Ø10	SAC 1020	180	mm	1.11
PESO TOTAL							68.15kg

PLANO PROPIEDAD CODELCO

PARA APLICACIÓN
NO APTO PARA FABRICACIÓN

COPIA NO CONTROLADA

SALFAMANTENCIONES

GABRIELA MISTRAL

SERVICIO DE MANTENIMIENTO GENERAL AREA CHANCADO, DGM.

DEPARTAMENTO MEJORAMIENTO CONTINUO 10024431-IMMEC-160-ME-PL-007-3

AREA OPERACION: CHANCADO

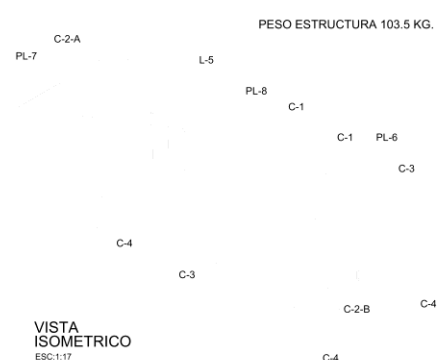
TITULO DEL PLANO: FABRICACION DE SOPORTE MOTOR Y EJE CARDANICOS HARNEROS 145-SN-009-010

REFERENCIA: NUMERO DE CONTRATO: 460021949 ESCALA: 1:12 LAMINA: 03 - 04

FORMATO A3 REVISION 0

REVISIONES	Nro.	REVISO	FECHA	DESCRIPCION	DIBUJO	NOMBRE	FIRMA	FECHA
A				EMITIDO P/REVISION INTER.	O.BARRAZA	O.BARRAZA		22/07/22
0				EMITIDO P/FABRICACION.	J.COSTERNA	J.COSTERNA		22/07/22
					J.COSTERNA	J.COSTERNA		22/07/22
					A.ARMENAKIS	A.ARMENAKIS		22/07/22

MESA PARA MOTOR HARNEROS 145-SN-009-010



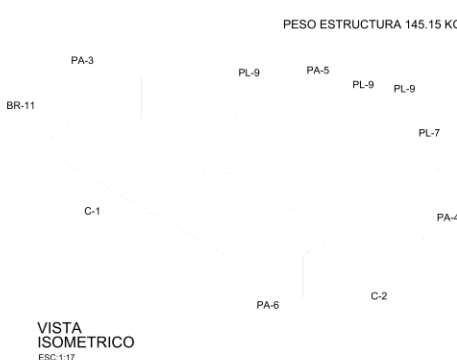
PLANO PROPIEDAD CODELCO

PARA APLICACIÓN
NO APTO PARA FABRICACIÓN

COPIA NO CONTROLADA

REVISIONES	Nro.	REVISO	FECHA	DESCRIPCION	DIBUJO	NOMBRE	FIRMA	FECHA
A				EMITIDO P/REVISION INTER.	O.BARRAZA	O.BARRAZA		22/07/22
0				EMITIDO P/FABRICACION.	J.COSTERNA	J.COSTERNA		22/07/22
					J.COSTERNA	J.COSTERNA		22/07/22
					A.ARMENAKIS	A.ARMENAKIS		22/07/22

SOPORTE PARA MOTOR Y EJE CARDANICO HARNEROS 145-SN-009-010



SALFAMANTENCIONES

GABRIELA MISTRAL

SERVICIO DE MANTENIMIENTO GENERAL AREA CHANCADO, DGM.

DEPARTAMENTO MEJORAMIENTO CONTINUO 10024431-IMMEC-160-ME-PL-007-4

AREA OPERACION: CHANCADO

TITULO DEL PLANO: ISOMETRICO MESA Y SOPORTE HARNEROS 145-SN-009-010

REFERENCIA: NUMERO DE CONTRATO: 460021949 ESCALA: 1:17 LAMINA: 04 - 04

FORMATO A3 REVISION 0

- NOTAS:**
- 1.- TODAS LAS MEDIDAS INDICADAS EN mm (S.I.C.)
 - 2.- TODAS LAS PIEZAS DEBEN IMPARSE DE ACEITES E IMPUREZAS ANTES DE SOLDAR.
 - 3.- MATERIALES PERFILES ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-36
 - 4.- SOLDADURA SEGUN AWS E6010 - E7018
 - 5.- APLICAR UNA CAPA ANTICORROSIVO EPOXICA COLOR ROJO
 - 6.- TERMINACION PINTURA: 1 CAPA EPOXICA RAL 1015

A.2 Propuesta de modificaciones sistema motriz 145-SN-009-010

