

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**"ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTO FINITO A
PLATAFORMA BIG COIL BAJO VIBRACIÓN ALEATORIA."**

POR:

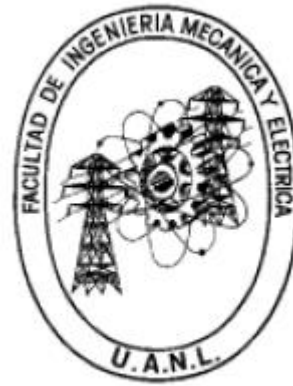
EDGAR JAVIER FLORES SAUCEDO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**"ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE ELEMENTO FINITO A
PLATAFORMA BIG COIL BAJO VIBRACIÓN ALEATORIA."**

POR:

EDGAR JAVIER FLORES SAUCEDO

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ.**

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Análisis estructural mediante elemento finito a plataforma Big-Coil bajo vibración aleatoria”, realizada por el/ estudiante Edgar Javier Flores Saucedo, con número de matrícula 2125669, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Dr. Pablo Ernesto Tapia González
Revisor

M.C. Milton Alberto Pérez Macías
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 554502

Acta Núm. 4435

Ciudad Universitaria, a 7 de noviembre 2024.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Diego Ledezma por siempre estar atento al seguimiento su guía en la realización de esta tesis.

A la Dr. Adriana Salas por su completo apoyo a lo largo de la duración de la maestría,

Al MC. Milton Pérez por su apoyo y su tutoría en el proceso, y al equipo de DRIVEN por proporcionar el tema, disposición y el seguimiento.

A FIME y a CONAHCYT.

A mi familia por tener siempre su apoyo.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.	1
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
1.3.1 HIPÓTESIS.....	5
1.4. CASOS DE ESTUDIO ANTERIORES	5
1.5. METODOLOGÍA.....	29
1.6. CRONOGRAMA	31
1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES	32
1.7.1 ALCANCES.....	32
1.7.2 LIMITACIONES.....	32
1.8. CONTENIDO DE LA TESIS.....	33
MARCO TEÓRICO.....	97
2.1 VIBRACIÓN.....	97
2.2 FALLA POR FATIGA.	98
2.3 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO [45].....	99
2.4 GEOMETRÍAS DEL ELEMENTO.	100
2.5 GENERACIÓN DE FALLA.	102
2.6 APLICACIÓN DE CARGA.....	103
2.7 CONDICIONES DE FRONTERA.	104
2.8 ANÁLISIS DE VIBRACIÓN.	105
2.9 PRUEBAS DE VIBRACIÓN.....	106
2.10 VIBRACION RANDOM.....	107
METODOLOGÍA.....	110
3.1 PREPROCESAMIENTO.....	110
3.2 LIMPIEZA DE LA GEOMETRÍA.	111
3.1 PROCESAMIENTO.	114
3.2 MALLADO.....	116
3.3 APLICACIÓN DE SECCIÓN.....	117
3.3 APLICACIÓN DE CONTACTOS.	118
3.4 APLICACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA.	121
3.5 APLICACIÓN DE CARGA.....	123
3.5 APLICACIÓN DE CONTROLES.....	126
RESULTADOS.....	129
4.1 RESULTADOS OBTENIDOS.	129

CONCLUSIONES.....	132
5.1 RECOMENDACIONES.....	132
Referencias	134

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES.

El transporte pesado es esencial para el movimiento eficiente de objetos, productos o mercancías de gran peso y volumen. Consiste en utilizar vehículos especializados, como camiones y tractocamiones con remolques, para trasladar estas cargas de un lugar a otro. Este tipo de transporte se utiliza en diversos sectores, como la construcción, la agricultura, la industria manufacturera y el comercio minorista.

Algunos ejemplos de mercancías transportadas de esta manera incluyen materiales de construcción, productos alimenticios, maquinaria, productos químicos y contenedores de carga. El transporte pesado requiere conductores capacitados, vehículos seguros y una planificación logística adecuada para garantizar que las mercancías lleguen a su destino de manera segura y puntual.

Las plataformas de carga en camiones son elementos integrados en la parte posterior de los vehículos para simplificar el proceso de carga y descarga de mercancías. Estas plataformas proporcionan una superficie segura y plana donde se colocan los productos para su transporte. Existen diferentes tipos de plataformas, como las fijas, que son estructuras sólidas permanentemente unidas a la parte trasera del camión, generalmente fabricadas con metal o madera. Estas plataformas brindan una superficie estable para cargar y descargar mercancías. Las plataformas de carga en camiones desempeñan un papel fundamental en la eficiencia logística, ya que facilitan el acceso y la manipulación de la carga tanto

en los puntos de origen como de destino. Además, garantizan que la carga esté asegurada adecuadamente durante el transporte, minimizando así el riesgo de daños o accidentes.

El acero laminado en rollos es ampliamente utilizado en diversas industrias debido a su resistencia y versatilidad. Se emplea en la fabricación de automóviles, electrodomésticos, maquinaria pesada, estructuras de construcción, tuberías y envases metálicos, entre otros. Estos rollos de acero se caracterizan por su capacidad de soportar cargas pesadas y su facilidad de conformado, se fabrican mediante la aplicación de calor y la deformación del acero a través de rodillos, obteniendo láminas o bandas continuas que luego se enrollan para facilitar su almacenamiento y transporte, en la Figura 1.1 se muestra un ejemplo.



Figura 1.1. Rollo de acero.

Los rollos de acero varían en dimensiones y pesos según las necesidades de cada aplicación. Debido a su tamaño y peso, su manipulación y transporte requieren de equipos especializados, como grúas o plataformas.

Otra consideración son las condiciones del camino, estas pueden variar y afectar la seguridad y la comodidad de los conductores, así como el estado de las mercancías.

1.1.2 PLATAFORMA BIG COIL.

El desarrollo de la plataforma Big Coil se presenta como una solución eficiente para el transporte de rollos de acero. A diferencia de las plataformas convencionales, esta estructura innovadora permite concentrar el peso en un único rollo de manera precisa, en lugar de distribuirlo en múltiples bobinas. Además, su capacidad de carga superior facilita el transporte de un mayor número de rollos por viaje, disminuyendo la frecuencia de los desplazamientos necesarios. Esta mejora no solo optimiza la eficiencia logística, sino que también contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, beneficiando así al medio ambiente, en la Figura 1.2. se muestra la plataforma Big Coil.



Figura 1.2. Plataforma Big Coil.

Dicha plataforma se encuentra en regla con lo pedido en la norma NOM-012-SCT-2-2017, donde se especifica que la plataforma es un tipo T3-S3 con 6 ejes y 22 llantas, como se observa en la figura 1.3.

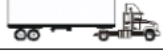
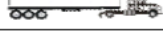
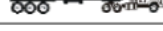
TRACTOCAMION ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Figura 1.3. Clasificación de camiones articulados, según NOM-012-SCT-2-2017.

NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017

El objetivo de esta regulación es establecer los requisitos relativos al peso, las dimensiones y la capacidad que deben cumplir los vehículos de autotransporte a nivel federal. Esto incluye tanto los servicios auxiliares como el transporte privado que utilizan las vías de comunicación federales. Cabe destacar que esta norma no se aplica a los vehículos tipo grúa destinados al remolque y salvamento [1].

1.2. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo principal de este estudio es realizar un análisis de elementos finitos (FEM) considerando cargas de vibración medidas experimentalmente para predecir los esfuerzos y, posteriormente, determinar la vida útil de la plataforma Big Coil.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES.

- Definir y depurar las geometrías para su análisis.
- Realizar el análisis para los 3 diferentes casos de estudio propuestos en este trabajo, para las diferentes posibilidades de transportar los rollos en la plataforma.
- Realizar el post procesamiento de los análisis en base a los registros de vibraciones obtenidos.
- Obtener estimado de ciclo de vida de la estructura de los 3 casos.

1.3.1 HIPÓTESIS.

Es posible obtener el ciclo de vida mediante un análisis de elemento finito considerando cargas de vibración medidas experimentalmente.

1.4. CASOS DE ESTUDIO ANTERIORES

1.4.1. Predicción mediante simulación de la vida a fatiga en componentes mecánicos sometidos a vibraciones aleatorias: metodología y parámetros a considerar [2].

En diversos campos de la ingeniería, es esencial dimensionar los componentes mecánicos para que puedan soportar vibraciones dinámicas que varían con el tiempo. Estas vibraciones variables inducen fenómenos de fatiga en los materiales, los cuales deben ser tenidos en cuenta para una predicción precisa de la vida útil por fatiga de dichos componentes.

Las vibraciones pueden clasificarse en deterministas o aleatorias. En el caso de vibraciones aleatorias, la evaluación de la respuesta temporal del componente

mediante modelos numéricos puede resultar impracticable. Por esta razón, se emplean métodos de resolución en el dominio de la frecuencia, utilizando como entrada los espectros de densidad de potencia (PSD) de la señal aleatoria de la excitación y obteniendo los PSD de la respuesta estructural.

Dado que múltiples aspectos, tanto experimentales como numéricos, influyen en la metodología utilizada para estimar la vida útil a fatiga de un componente, este trabajo presenta un estudio detallado sobre la influencia de diversos parámetros a lo largo de dicho proceso. Se ha investigado cómo la variación de los siguientes parámetros afecta la predicción del daño por fatiga:

Frecuencia natural

Amortiguamiento modal

Resistencia del material

Límite de fatiga del componente

Resultados del modelo numérico

Resolución frecuencial

1.4.2. Fatiga por Vibración Aleatoria Probabilística [3].

Los componentes industriales sometidos a fatiga por vibración aleatoria (carga con una densidad espectral de potencia, PSD, o un espectro sinusoidal) son frecuentemente diseñados utilizando simulaciones numéricas para estimar la vida útil y asegurar el comportamiento del sistema mecánico.

Las simulaciones por elementos finitos requieren una cantidad significativa de parámetros de entrada para resolver el problema (propiedades del material como el módulo de Young, densidad, rigidez de las uniones entre componentes, elección del tipo de elemento del modelo, etc.). Algunos de estos parámetros se identifican a partir de pruebas que presentan una incertidumbre inevitable, mientras que otros están sujetos a variabilidad inherente. Es crucial conocer la influencia de esta variabilidad e incertidumbre en las respuestas del modelo. Se

han desarrollado métodos innovadores para determinar la sensibilidad de las respuestas del modelo a parámetros inciertos con el fin de estudiar la robustez del diseño.

La identificación de los parámetros más influyentes, junto con el estudio de sus variaciones, permite determinar la dispersión de los resultados en el análisis modal (frecuencias propias, formas modales), el cálculo de vibración aleatoria (restricciones RMS) y el cálculo de daño.

Esta metodología proporciona una estimación de la probabilidad de fallo del sistema en lugar de un resultado binario obtenido mediante un método de diseño determinista.

1.4.3. Enfoque de vida a fatiga para componentes grandes en la ingeniería de plantas pesadas basado en la contabilización de flujo de lluvia de deformaciones locales [4].

En la industria cementera, el diseño de los componentes se lleva a cabo mediante el método de elementos finitos, y esta metodología se verifica a través de mediciones de deformación en máquinas en operación industrial utilizando el conteo de flujo de lluvia. Se desarrolló un modelo de cálculo para evaluar estos datos. Este modelo fue calibrado específicamente para el material EN-GJS-400-15U, empleando pruebas de fatiga tanto con amplitud constante como aleatoria, basándose en datos obtenidos de mediciones. Para la preparación de las pruebas, se ideó un método para omitir ciclos de carga antes de la reconstrucción de la secuencia de carga.

Los resultados experimentales demostraron una precisión adecuada al utilizar una suma de daño característica constante, que puede mejorarse al considerar el potencial de daño de los espectros de carga.

1.4.4. Fatiga de estructuras en entornos de vibración mecánica. Desde la caracterización de la misión hasta la predicción de la vida útil por fatiga [5].

La durabilidad de los componentes que operan en un entorno de vibración mecánica se valida habitualmente en bancos de prueba de vibración, utilizando una prueba simplificada y acelerada derivada de la caracterización de la misión y del proceso de síntesis de pruebas. La base de este método es la equivalencia de daño, en la que la prueba acelerada conduce al mismo contenido de daño por fatiga que el observado en condiciones reales de servicio. La simulación numérica puede ayudar a optimizar este proceso, permitiendo verificar que la prueba sintética sea realista y proporcionando la distribución de daño basada en las leyes de comportamiento del material real.

En este artículo se describe el enfoque completo y se ilustra con algunas aplicaciones reales. También se presenta la extensión de los métodos espectrales clásicos a la plasticidad confinada con validación experimental en laboratorio.

1.4.5. Situaciones de carga multiaxial en fatiga por vibración aleatoria: desfase y correlación cruzada [6].

El daño por fatiga se relaciona con cargas que varían en el tiempo, manifestándose en historiales locales de tensión o deformación. Sin embargo, en algunos casos de carga, tanto en pruebas de laboratorio como en aplicaciones reales, resulta más eficiente determinar y definir las cargas en el dominio de la frecuencia, ya sea mediante barridos sinusoidales deterministas o procesos estacionarios aleatorios. La simulación de estas señales en mesas vibradoras para cargas uniaxiales ha sido ampliamente estudiada anteriormente.

No obstante, al considerar múltiples cargas que están correlacionadas de alguna manera, es necesario tener en cuenta nuevos factores, ya que la correlación o el desfase afectan significativamente la vida útil por fatiga. Un ejemplo de esto es la carga en el chasis de un camión, donde existe una correlación clara entre las cargas de los ejes delantero y trasero.

En este documento, se describe la metodología para gestionar múltiples cargas y el manejo adecuado de las tensiones locales evaluadas a partir de múltiples señales correlacionadas para el análisis de fatiga. Demostramos por qué los

enfoques tradicionales de tensión equivalente, basados en los criterios de Von Mises o tensiones principales, pueden ser problemáticos, y defendemos el uso del enfoque del plano crítico. Además, discutimos cómo se puede analizar la información sobre el comportamiento ante cargas en fase y fuera de fase y su aplicación en el diseño de mejores configuraciones de prueba en mesas vibradoras.

1.4.6. Un método mejorado de conteo de ciclos de lluvia para estados de tensión multiaxial utilizando el método del círculo circunscrito mínimo para identificar rangos de esfuerzo cortante [7].

La mayoría de los métodos de análisis de ciclos de carga se han desarrollado para evaluar estados de tensión uniaxial. En este trabajo se presenta un enfoque novedoso para el análisis de ciclos de carga en condiciones de tensión multiaxial. El método propuesto se basa en un procedimiento de dos etapas que modifica el algoritmo estándar de la ASTM para el análisis de ciclos de carga uniaxial, incorporando la identificación de rangos de tensión normal y los índices de inicio y fin de cada ciclo. Para cada ciclo identificado, se evalúan los rangos de tensión cortante utilizando el método del círculo circunscrito mínimo, basado en los puntos de inicio y fin del ciclo. Este enfoque se compara con dos métodos comúnmente utilizados para el análisis de ciclos de carga multiaxial mediante la utilización de datos simulados y experimentales.

1.4.7. Resistencia a la fatiga de los metales bajo esfuerzos alternos de amplitud variable [8].

Se han establecido criterios de evaluación de daño por fatiga junto con modelos predictivos para estimar la vida útil y los límites de fatiga de elementos metálicos sujetos a tensiones alternas de amplitud variable. Se llevaron a cabo ensayos de fatiga utilizando configuraciones específicas en máquinas de prueba diseñadas para tal fin, utilizando especímenes de acero de bajo y alto contenido de carbono, así como duraluminio, tanto con como sin defectos artificiales. Los resultados

obtenidos sugieren que la vida útil y los límites de fatiga de los metales bajo cargas cíclicas variables pueden ser determinados mediante el enfoque analítico propuesto en este estudio.

1.4.8. Modelo de daño a escala múltiple para la fatiga mecánica de alto ciclo (HCF) de termoplásticos reforzados con fibras cortas de vidrio (SGFRTP) [9].

El diseño de estructuras ligeras y de costo eficiente es un desafío importante en todas las industrias, especialmente en el sector del transporte. Para cumplir con este objetivo, se están utilizando termoplásticos reforzados con fibras cortas de vidrio (SGFRTP) como sustitutos de algunas piezas metálicas. Hasta la fecha, su aplicación en componentes estructurales ha sido limitada debido a la falta de herramientas predictivas de simulación numérica, especialmente bajo cargas de fatiga. Este estudio presenta un enfoque para modelar la fatiga de alto ciclo (HCF) en polímeros termoplásticos no reforzados, lo cual servirá de base para desarrollar un modelo HCF aplicable a los SGFRTP.

1.4.9. Evaluación de estructuras de acero existentes - Recomendaciones para la estimación de la vida útil restante por fatiga [10].

Este estudio presenta un protocolo para la evaluación de fatiga en estructuras de acero ya existentes, abordando la caracterización de materiales históricos y la aplicación de métodos de ensayo no destructivos para la evaluación detallada. Se enfoca en la identificación y propuesta de medidas correctivas para puntos críticos y daños atribuibles a la fatiga. El enfoque metodológico puede ser implementado en estructuras de acero sometidas a cargas cíclicas, con particular atención en la infraestructura vial que utiliza acero antiguo, dada su relevancia pública. Este procedimiento integra y sintetiza conocimientos técnicos para facilitar su aplicación por profesionales del sector, constituyendo un avance significativo en la actualización de técnicas de evaluación estructural.

1.4.10. DAÑO: validación experimental y perspectivas [11].

Durante el funcionamiento operativo, los componentes de los motores espaciales están expuestos a condiciones de carga que frecuentemente involucran altos niveles de carga multiaxial y complejas historias de carga. Estas condiciones incluyen típicamente altas relaciones de carga y solicitudes de baja amplitud debido a vibraciones (fatiga de alto ciclo), así como cargas de alta amplitud durante el inicio y apagado del motor (fatiga de bajo ciclo). Se ha encontrado que un modelo de daño basado en la ley de daño de Lemaitre es efectivo para abordar escenarios de fatiga de bajo ciclo, donde se observa plasticidad y daño a escala macroestructural. Bajo condiciones de cargas de baja amplitud, como las vibraciones, el comportamiento del material tiende a mantenerse predominantemente elástico a escala macro. Sin embargo, la falla eventualmente ocurre debido a micro-plasticidad y micro-daño, lo cual conduce a la iniciación de una grieta a nivel macroscópico. Para enfrentar el desafío de predecir la vida útil en el dominio de fatiga de alto ciclo, LMT Cachan ha desarrollado un enfoque de daño en dos escalas.

1.4.11. Enfoques para implementar el diseño seguro desde las etapas iniciales del diseño del producto mediante la combinación de evaluación de riesgos y evaluación del ciclo de vida [12].

El concepto de Diseño Seguro (SbD) busca asegurar la producción, uso y disposición seguros de materiales y productos. Aunque hay un interés creciente en el potencial del SbD para respaldar compromisos políticos como el Pacto Verde Europeo y el Plan de Acción de Economía Circular en Europa, hay una notable escasez de enfoques metodológicos y directrices prácticas. La combinación de la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) y la Evaluación de Riesgos (RA) se considera apropiada para operativizar el SbD a lo largo del ciclo de vida completo de un producto. En este contexto, se explora el potencial del uso conjunto de LCA y RA en niveles de Preparación Tecnológica (TRL) 1–6. Se

realiza una revisión de la literatura que describe y/o desarrolla enfoques combinados de LCA y RA en las primeras etapas del diseño de productos. Se observa que las evaluaciones iniciales básicas de seguridad (por ejemplo, la aplicación del pensamiento de ciclo de vida para identificar puntos críticos de riesgo, la minimización del uso de productos químicos peligrosos y la reducción de otros impactos ambientales asociados con productos químicos) son comunes, mientras que evaluaciones más complejas (como LCA ex-ante, bandas de control, (eco)toxicología predictiva) requieren habilidades especializadas. La implementación de estos enfoques y directrices simplificados tiene como objetivo mitigar riesgos e impactos evidentes en las etapas tempranas del diseño. Para una aplicación más amplia del SbD, es crucial abordar lagunas críticas, incluyendo más estudios contextualizados en el diseño de productos, el desarrollo de herramientas y bases de datos consolidadas que almacenen información sobre riesgos, una mayor colaboración entre investigadores de RA/LCA y empresas, así como discusiones políticas sobre la expansión del SbD hacia el Diseño Seguro y Sostenible (SSbD).

1.4.12. Análisis por elementos finitos (FEA) del esfuerzo estructural del sistema Modalohr para el transporte ferroviario de semirremolques: enfoque en la fatiga del cordón de soldadura [13].

El objetivo implica desarrollar un modelo integral de análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar tanto el comportamiento estructural global de la flexión y torsión del vehículo como el análisis de fatiga en cada unión, incluidos los bordes y raíces de la soldadura. La realización de análisis de tensiones locales detallados requiere muchos recursos y requiere el uso de elementos de carcasa inclinados apropiados dentro de un modelo global. Estas metodologías están integradas en una herramienta propia. El desarrollo "Seam Sim" de LOHR automatiza la generación parcial de modelos FEA utilizando características de soldadura sólida generadas por CAD, logrando la idealización sin operaciones manuales adicionales. Una herramienta de postprocesamiento personalizada

facilita el procesamiento de resultados del código FEA estándar para evaluaciones estáticas y de fatiga. Las salidas incluyen mapas de márgenes de seguridad de tensión escalar para cada elemento, adaptados a criterios específicos relevantes para áreas del sistema como metal simple, bordes de chapa, bordes de soldadura, raíces de soldadura y conexiones de pernos.

1.4.13. Investigación de linealidad desde un banco de fatiga vibratoria [14].

El estudio aborda la evaluación del banco de fatiga vibratoria desarrollado en el laboratorio de mecánica de Normandía, el cual emplea un agitador electrodinámico capaz de alcanzar frecuencias de excitación superiores a las máquinas estándar de fatiga. La investigación se centra en obtener el comportamiento de fatiga de alto ciclo de estructuras mediante pruebas vibratorias, utilizando funciones de respuesta en frecuencia y transmisibilidades. Para asegurar la validez de los resultados, se realizaron análisis de correlación entre las señales de excitación y respuesta, determinando así los parámetros óptimos para mantener la linealidad del sistema. Además, se discuten las dificultades inherentes a la ejecución de los experimentos.

1.4.14. Técnicas de medición de fatiga de muy alto ciclo [15].

Las componentes de maquinaria y estructuras portantes deben resistir una alta cantidad de ciclos, que van desde 10^8 (como en ruedas de vehículos, ejes, motores, y equipos aeroespaciales) hasta ocasionalmente más de 10^{10} ciclos (en trenes, estructuras marinas y puentes). La investigación de las propiedades de fatiga de muy alto ciclo (VHCF) en metales y aleaciones ha ganado prominencia, especialmente debido a que aceros de alta resistencia han mostrado fallos a amplitudes cíclicas inferiores al límite tradicional de fatiga cuando se exceden los 10^8 ciclos de carga. Desde entonces, se ha enfocado en desarrollar conceptos para reducir los prolongados tiempos de prueba, dando lugar al desarrollo de nuevas máquinas de ensayo. Este artículo revisa los

principios y técnicas de prueba correlacionadas, abordando aspectos como el modo de carga, la medición de esfuerzo, deformación y desplazamiento, la temperatura, métodos de conteo de ciclos y la detección del crecimiento de grietas. Se presentan resultados significativos sobre la formación y propagación de grietas pequeñas y grandes, así como los umbrales influenciados por características microestructurales particulares. Además, se examinan los efectos de cargas superpuestas y de amplitud variable, junto con consideraciones sobre la frecuencia de carga.

1.4.15. Parámetros críticos para el daño por fatiga [16].

El análisis del daño por fatiga se examina desde una perspectiva histórica, revelando discrepancias fundamentales entre experimentos y modelos/interpretaciones. Para abordar estas discrepancias, se ha desarrollado un enfoque basado en dos parámetros de fuerza impulsora para analizar el comportamiento de fatiga de manera intrínseca. Se propone unificar los procesos de daño, desde la iniciación de grietas hasta la falla final, introduciendo tres parámetros clave: K , K_{max} y la contribución de la tensión interna a K_{max} . Además, se consideran los efectos ambientales y de temperatura que pueden influir en estos parámetros. Se destaca la relevancia de K_{max} en el proceso general de daño, identificando la tensión interna como un factor crucial para cerrar la brecha entre las etapas de formación de grietas y la falla estructural. Ejemplos concretos respaldan esta perspectiva. Finalmente, se subraya la necesidad de datos experimentales sistemáticos y modelado analítico para describir los gradientes de tensión interna y desarrollar una metodología robusta de predicción de vida útil.

1.4.16. Avances en la metodología de predicción de vida útil por fatiga para materiales metálicos [17].

El artículo tiene como objetivo evaluar la capacidad de un modelo de cierre de grieta inducido por plasticidad para pronosticar las tasas de crecimiento de

grietas pequeñas y grandes, así como en algunos casos la vida útil completa por fatiga, en cuatro aleaciones de aluminio y tres de titanio sometidas a cargas de amplitud constante, variable y espectro. Se examinaron ecuaciones para calcular un factor de intensidad de esfuerzo efectivo ajustado por la zona plástica cíclica, derivado de un integral J cíclico y análisis de cierre de grietas en grietas extensas. Las relaciones entre el rango del factor de intensidad de esfuerzo efectivo y la tasa de crecimiento de grietas se emplearon en el modelo de cierre para prever el desarrollo de grietas pequeñas y grandes bajo cargas de amplitud variable y espectro. Mediante el modelo de cierre y características microestructurales, se presenta un método para predecir la vida útil total por fatiga de tres aleaciones de aluminio bajo diversas historias de carga.

1.4.17. Efectos de grietas pequeñas en aleaciones de aluminio de alta resistencia [18].

El informe detalla los descubrimientos del Programa Cooperativo de Mecánica de Fatiga y Fractura, destacando su avance en la vanguardia de la investigación en este campo. Ha facilitado a las industrias aeroespaciales datos empíricos valiosos y métodos de análisis eficaces para perfeccionar la predicción de vida útil. Estos avances tienen el potencial de aumentar significativamente la fiabilidad y seguridad de las estructuras de aeronaves.

1.4.18. Metodología de predicción de vida útil por fatiga y crecimiento de grietas [19].

Este artículo examina las capacidades de un modelo de cierre de grieta inducido por plasticidad y un código de predicción de vida útil para estimar el crecimiento de grietas por fatiga y la durabilidad de materiales metálicos. Se han considerado factores de restricción en la punta de grieta para abordar efectos tridimensionales, correlacionando datos de tasas de crecimiento de grietas grandes con el rango del factor de intensidad de esfuerzo efectivo bajo cargas de amplitud constante. Se realizaron ajustes en las relaciones cercanas al umbral

para adecuar el comportamiento de la tasa de crecimiento de grietas pequeñas y los límites de resistencia. Posteriormente, el modelo se aplicó para calcular tasas de crecimiento de grietas pequeñas y grandes, y en algunos casos, predecir las vidas útiles totales, evaluando varias aleaciones de aluminio y titanio bajo diferentes perfiles de carga. Las vidas útiles por fatiga se determinaron utilizando las relaciones de crecimiento de grietas y considerando características microestructurales relevantes para la iniciación de grietas. Los resultados obtenidos de los ensayos y análisis mostraron una buena concordancia.

1.4.19. Metodología de predicción de vida útil por fatiga y crecimiento de grietas [20].

Esta revisión se aborda desde la perspectiva de la "propagación de grietas". Con el avance de los métodos para observar el proceso de "fatiga", se ha logrado detectar la formación de microgrietas en etapas más tempranas de la vida útil del material y medir tamaños de grietas más pequeños. Estas observaciones indican que el daño por fatiga puede caracterizarse actualmente por el "tamaño de la grieta". Simultáneamente, los métodos de análisis del crecimiento de grietas, utilizando factores de intensidad de esfuerzo, también han experimentado mejoras. Sin embargo, es necesario incorporar en estos análisis los efectos de la falta de homogeneidad del material, los mecanismos de fractura de grietas y el comportamiento no lineal. El descubrimiento de mecanismos de cierre de grietas, como la plasticidad, la rugosidad y los residuos de óxido/corrosión/desgaste, y el uso del rango efectivo del factor de intensidad de esfuerzo, ha proporcionado una herramienta de ingeniería para predecir el comportamiento de las tasas de crecimiento de grietas pequeñas y grandes bajo condiciones de carga en servicio. Estos mecanismos también han fundamentado el desarrollo de nuevos materiales tolerantes al daño.

1.4.20. Metodología eficiente de optimización estructural basada en fiabilidad [21].

Los avances recientes en los métodos de fiabilidad estructural, optimización y análisis de sensibilidad han propiciado el desarrollo de herramientas computacionales que soportan procesos de Optimización del Diseño Basada en la Fiabilidad (RBDO). En estos procesos, la optimización determinista se amplía con restricciones sobre las prestaciones de fiabilidad estructural. Sin embargo, la aplicación práctica de estas herramientas aún presenta importantes limitaciones, principalmente debido a su baja eficiencia computacional. Se ha implementado un proceso RBDO de dos niveles: en el nivel externo, la optimización se lleva a cabo mediante un algoritmo de Programación Cuadrática Secuencial (SQP), mientras que, en el nivel interno, el análisis de fiabilidad se realiza mediante métodos de primer o segundo orden (FORM/SORM). A un nivel más interno, es necesario realizar evaluaciones computacionalmente intensivas, como el Análisis de Sensibilidad del Diseño (DSA) y el Análisis Estructural mediante Elementos Finitos (FEA). Se presentan varios ejemplos que demuestran la eficiencia del método.

1.4.21. Diseño fiable contra fatiga, por reglas estrictas, por magia o por ingeniería ilustrada [22].

Este artículo examina las diferencias clave entre los enfoques de ingeniería para la evaluación de la fiabilidad en relación con la fatiga. La comparación se basa en el hecho de que la fatiga mecánica es una disciplina altamente empírica con grandes incertidumbres en el conocimiento previo, tanto en términos de datos observados como de precisión del modelo. Se sostiene que la cantidad de conocimiento físico previo disponible debe determinar el nivel de complejidad en las herramientas de fiabilidad, en lugar de los recursos informáticos o la teoría matemática. Como resultado, se propone la estadística del segundo momento como una herramienta valiosa para la evaluación de la fiabilidad en relación con la fatiga, ya sea en la forma regulada como se encuentra en el Euro código o en

una forma de ingeniería libre como a través del Análisis de Modo y Efecto de Variación. Este último método se describe con detalle y se demuestra su utilidad práctica para abordar diversos problemas de fiabilidad en ingeniería.

1.4.22. Análisis de la vibración de vigas agrietadas utilizando el método de elementos finitos [23].

La mayoría de los estudios disponibles en la literatura asumen que la fisura en un elemento estructural permanece abierta de manera constante durante la vibración. No obstante, esta hipótesis puede resultar inexacta bajo condiciones de cargas dinámicas predominantes. En tales circunstancias, la fisura experimenta un proceso de respiración, es decir, se abre y cierra de forma periódica durante la vibración, lo que induce variaciones en la rigidez de la estructura. Estas fluctuaciones provocan que la estructura manifieste un comportamiento dinámico no lineal. Una característica distintiva de este comportamiento es la presencia de componentes armónicos de orden superior. Específicamente, una viga con una fisura que respira presenta frecuencias naturales que se sitúan entre las de una viga intacta y las de una viga con una fisura abierta permanente.

1.4.23. Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axisimétrica: estudio complementario [24].

Este estudio presenta un método novedoso para la caracterización modal, que se distingue de los métodos tradicionales de análisis al no requerir que la respuesta en cada resonancia esté dominada por un solo modo. La implementación de este procedimiento en una estructura real demuestra la viabilidad de estimar parámetros modales asociados con modos cercanos utilizando una cantidad reducida de datos de respuesta vibratoria. Además, este método ofrece resultados precisos incluso en presencia de ruido en las mediciones.

1.4.24. Comparación entre la estimación de parámetros modales de estructuras a partir de análisis modal clásico y operacional con modificaciones de masa [25].

El propósito principal de este estudio es realizar una comparación exhaustiva entre el análisis modal tradicional, que se acompaña de simulaciones numéricas de modificación de masa, y el análisis modal operacional, que se combina con el método de modificación de masa. Se busca obtener resultados más óptimos y con un margen de error reducido, incluso cuando se presenta un alto nivel de ruido en la señal.

1.4.25. Identificación del parámetro modal de respuestas de entradas aleatorias generales desconocidas [26].

Este estudio se centra en la investigación de respuestas estructurales generadas por entradas aleatorias desconocidas. Las técnicas de identificación tradicionales generalmente asumen la presencia de ruido blanco o ruido aleatorio estacionario, empleándose estas hipótesis incluso cuando las condiciones de las entradas no cumplen estos criterios.

Para abordar este desafío, se propone una metodología que incorpora un sistema de conversión de fuerzas a la estructura analizada. Este sistema de conversión recibe como entrada ruido blanco, produciendo como salida las fuerzas reales aplicadas a la estructura. Posteriormente, se utilizan tanto las entradas de ruido blanco como las respuestas estructurales para identificar el sistema combinado. Los parámetros obtenidos a partir de esta identificación se clasifican en dos categorías principales: parámetros estructurales y características de las fuerzas de entrada. Esta clasificación permite una mejor comprensión de las propiedades dinámicas del sistema bajo estudio, proporcionando información esencial para la evaluación y el diseño de estructuras.

1.4.26. Modificación dinámica estructural de sistemas vibratorios [27].

En el diseño de sistemas mecánicos y estructuras, los requisitos de vibración y acústica se están volviendo cada vez más cruciales. La necesidad de ajustar el comportamiento estructural para abordar problemas de ruido y vibraciones suele surgir durante la etapa de diseño o de prototipo, conduciendo al desafío de la modificación estructural. La modificación dinámica estructural (SDM), una técnica que aplica el análisis modal, se utiliza para estudiar cómo los cambios en las variables físicas y geométricas afectan las propiedades dinámicas de un sistema estructural, especialmente en relación con las frecuencias y formas modales.

Se describen los enfoques y formulaciones esenciales para la SDM en sistemas vibratorios. Se investigan las alteraciones en el comportamiento dinámico de una estructura debidas a modificaciones en la masa, amortiguamiento y rigidez. La aplicación de la SDM en estructuras de ingeniería reales es ilustrada, subrayando la relevancia de determinar las modificaciones estructurales en términos de cambios físicos y geométricos asociados con los parámetros de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura vibratoria.

Este documento considera tratamientos de diseño y tecnológicos destinados a alcanzar propiedades vibratorias y acústicas óptimas en sistemas vibratorios. Además, se analizan las propiedades modales de estructuras seleccionadas bajo la influencia de modificaciones en los parámetros físicos, proporcionando una base sólida para el diseño eficiente y el control de vibraciones en sistemas mecánicos.

1.4.27. Técnicas de identificación dinámica para detectar numéricamente el daño estructural [28].

La detección de daños en estructuras de ingeniería civil a través de variaciones en los parámetros modales medidos ha captado considerable atención en la literatura reciente. Este estudio examina dos técnicas experimentales distintas para predecir la localización y severidad del daño: el método de cambio en las

formas modales y el método de curvatura de las formas modales. Estas metodologías se han aplicado a un modelo de puente de elementos finitos con apoyo simple, donde el daño se simula reduciendo adecuadamente la rigidez flexional.

Los resultados indican que una alteración en la curvatura modal es un indicador notablemente significativo de daño. En contraste, índices como MAC y COMAC, que se emplean ampliamente y de manera correcta para la actualización de modelos de elementos finitos, resultan menos efectivos para la detección de daños. Este hallazgo resalta la relevancia de la curvatura modal como una herramienta superior para la identificación de daños estructurales en aplicaciones de ingeniería civil.

1.4.28. Modificación dinámica estructural [29].

En el diseño de estructuras mecánicas, los requisitos de vibración y acústica están adquiriendo una importancia creciente. Sin embargo, a menudo no son una preocupación primaria durante el proceso de diseño. Es frecuente que sea necesario ajustar el comportamiento estructural para resolver problemas de ruido y vibración que surgen durante la etapa de prototipo, lo que plantea el desafío conocido como modificación estructural.

En este estudio, se aborda el problema directo de determinar la nueva respuesta de un sistema después de introducir algunas modificaciones. Se utilizan dos bases de datos diferentes: la base de datos modal y la base de datos de función de respuesta de frecuencia (FRF). Se analiza la base de datos modal para comprender mejor las modificaciones estructurales que pueden incluir masas concentradas, resortes, amortiguadores y absorbentes dinámicos. Este enfoque permite una evaluación más precisa de las propiedades dinámicas del sistema modificado y facilita el diseño de soluciones efectivas para mitigar problemas de vibración y ruido.

1.4.29. La actualización del modelo de elementos finitos: una herramienta potente para el monitoreo de la salud estructural [30].

La necesidad de métodos no destructivos para evaluar la fiabilidad estructural está en continuo crecimiento. En este contexto, se presenta la solución VCUPDATE para la actualización de modelos de elementos finitos. VCUPDATE es un código desarrollado en Scilab que implementa un algoritmo de actualización iterativa, integrado con un software de elementos finitos como OpenSees o ANSYS para llevar a cabo el análisis numérico. La validez del código ha sido confirmada a través de múltiples aplicaciones en vigas y cables tensores. En este estudio, el código se aplica a dos casos prácticos utilizando tanto OpenSees como ANSYS, demostrando su efectividad en entornos reales.

1.4.30. Métodos dinámicos para la detección de daños en estructuras [31].

Las técnicas de prueba no destructiva, orientadas a la monitorización, identificación estructural y diagnóstico, desempeñan un papel estratégico en diversas áreas de la ingeniería civil y mecánica. Estas pruebas se utilizan extensamente y tienen un impacto directo en temas relevantes relacionados con el diseño de nuevas construcciones y la reparación y supervisión de estructuras existentes. La capacidad portante de una estructura puede ahora evaluarse empleando métodos de modelado mecánico consolidados, apoyados por herramientas computacionales avanzadas. No obstante, para obtener resultados precisos, es esencial calibrar los modelos con información detallada sobre las características de los materiales y componentes estructurales.

En este contexto, las técnicas no destructivas representan una herramienta valiosa desde múltiples perspectivas. Específicamente, al medir la respuesta estructural, estas técnicas facilitan la validación de las descripciones

estructurales o de los modelos matemáticos que describen el comportamiento del material, asegurando así la fiabilidad y precisión de los análisis estructurales.

1.4.31. Un método novedoso basado en la sensibilidad para la detección de daños en un elemento estructural [32].

Se presenta un método innovador y eficiente para la identificación de la ubicación y severidad de daños en elementos estructurales, utilizando modos de vibración y frecuencia natural circular. Este método se fundamenta en el análisis de sensibilidad de la estructura y permite la actualización del modelo de un elemento estructural finito mediante un proceso iterativo basado en el algoritmo de Levenberg-Marquardt. El enfoque propuesto sobresale en su capacidad para localizar y evaluar la magnitud de los daños estructurales, incluso en condiciones de ruido o respuestas incompletas. La eficacia y el desempeño del método se han evaluado a través de estudios de casos numéricos, demostrando su robustez y aplicabilidad en la práctica.

1.4.32. Detección de daños estructurales basada en la flexibilidad estática y dinámica: una revisión y estudio comparativo [33].

Se presenta un método innovador y eficiente para la identificación de la ubicación y severidad de daños en elementos estructurales, utilizando modos de vibración y frecuencia natural. La identificación oportuna de daños en materiales estructurales es esencial para evitar accidentes en el ámbito de la ingeniería. Los métodos que emplean la flexibilidad estructural para la detección de daños han cobrado relevancia debido a su simplicidad y practicidad. Este artículo proporciona una revisión de estas técnicas, clasificándolas en varias categorías: diferencia de flexibilidad, índice de derivada de flexibilidad, sensibilidad de flexibilidad, descomposición de flexibilidad, flexibilidad estática y métodos combinados con otros enfoques.

Cada una de estas técnicas presenta ventajas y desventajas particulares:

- **Diferencia de flexibilidad:** Su cálculo es sencillo y no requiere un modelo de elementos finitos, pero necesita datos modales de la estructura intacta y no permite cuantificar el grado de daño.
- **Índice de derivada de flexibilidad:** Requiere únicamente datos modales de la estructura dañada para localizar el daño, aunque es muy sensible al ruido en los datos y puede llevar a errores de interpretación.
- **Sensibilidad de flexibilidad y descomposición de flexibilidad:** Permiten determinar simultáneamente la ubicación y la magnitud del daño, pero requieren la creación de modelos precisos de elementos finitos.
- **Flexibilidad estática:** Compensa las limitaciones de los métodos de flexibilidad dinámica, aunque puede interferir con el uso normal de la estructura durante las pruebas.

La integración de estos métodos con algoritmos avanzados e inteligentes, así como con otras técnicas, puede mejorar notablemente la precisión y eficiencia en la detección de daños estructurales. Además, el artículo discute los desafíos aún pendientes en los métodos de detección de daños basados en la flexibilidad estructural, destacando la necesidad de continuar la investigación y el desarrollo en este campo.

1.4.33. Detección de Daños Estructurales a Través de Cambios en la Frecuencia [34].

Entre las características de vibración estructural, las frecuencias naturales se destacan por su simplicidad y precisión de medición, proporcionando información global sobre daños estructurales. Este estudio investiga la viabilidad de utilizar únicamente las frecuencias naturales para la identificación de daños estructurales.

Se abordan diversos aspectos de la detección de daños, tales como la problemática de los datos modales incompletos y la robustez del proceso de

detección. Para demostrar la efectividad de las técnicas basadas en la frecuencia, se emplea un marco de tres pisos sometido a pruebas en laboratorio. Los resultados numéricos indican que es posible localizar correctamente el elemento dañado e identificar el grado de daño con un alto nivel de precisión a través de los cambios en las frecuencias naturales.

1.4.34. La localización de defectos en estructuras a partir de mediciones de frecuencias naturales [35].

Se presenta un método para la evaluación no destructiva de la integridad de las estructuras mediante la medición de frecuencias naturales estructurales. Este enfoque demuestra cómo las mediciones realizadas en un único punto de la estructura pueden utilizarse para la detección, localización y cuantificación de daños. El método propuesto emplea el análisis de elementos finitos, que es aplicable a cualquier tipo de estructura, aunque el principio puede combinarse con otras técnicas matemáticas.

Para cada tipo de estructura, solo se requiere realizar un análisis completo. Los resultados obtenidos se basan en pruebas realizadas en una placa de aluminio y una placa de plástico reforzado con fibra de carbono en orientación cruzada. Los datos muestran una excelente concordancia entre los sitios de daño predichos y los observados, proporcionando una indicación útil de la magnitud del defecto.

1.4.35. Pruebas de vibración como herramienta de ensayo no destructivo para materiales compuestos [36].

Se presenta una técnica de vibración para la evaluación no destructiva de la integridad estructural, aplicada a componentes fabricados con plásticos reforzados con fibra. El método se basa en la medición de cambios en las frecuencias naturales estructurales bajas, las cuales pueden obtenerse en un único punto de la estructura. Este enfoque se combina con un análisis dinámico del sistema para detectar, localizar y estimar de manera aproximada el daño presente.

El modelo matemático necesario para esta evaluación no requiere ser altamente complejo; de hecho, se necesita solo un análisis para cada tipo de estructura a evaluar. La técnica ha demostrado ser eficaz para detectar y localizar diversos tipos de daño en estructuras que son representativas del uso de materiales reforzados con fibra en la industria aeroespacial. Adicionalmente, se proporciona una estimación de la severidad del daño.

1.4.36. Una técnica de vibración para evaluar de manera no destructiva la integridad de las estructuras [37].

Se presenta un método para la evaluación no destructiva de la integridad de las estructuras, aplicable a aquellas para las cuales un análisis unidimensional resulta adecuado. El enfoque descrito utiliza mediciones de vibración tomadas en una única estación dentro de la estructura, combinadas con un modelo teórico pertinente, para determinar la ubicación y la magnitud de defectos. En este estudio, se emplea el análisis de receptancia; sin embargo, el principio subyacente es igualmente aplicable a otras técnicas de análisis matemático.

Se han realizado experimentos en diversos componentes, como barras prismáticas rectas, una barra cónica doble y un árbol de levas de automóvil. Los resultados experimentales muestran una excelente concordancia entre los sitios de daño predichos y los observados. Aunque el análisis se basa principalmente en el modo axial de vibración, también se han realizado con éxito pruebas en torsión.

1.4.37. Identificación de daños estructurales utilizando datos modales: verificación por simulación [38].

Las variaciones en las características modales de una estructura ofrecen una indicación directa del daño presente. En este estudio, se propone una técnica de identificación de daños basada en los cambios en las frecuencias y formas

modales de vibración para predecir la ubicación y la severidad del daño. Esta metodología se aplica a nivel de elementos utilizando un modelo de elementos finitos convencional. Las ecuaciones de daño a nivel de elemento se derivan a partir de las ecuaciones de valores propios que describen el comportamiento dinámico.

Se analizan y comparan varias técnicas de solución para esta metodología, y se examina el impacto del ruido simulado en los datos modales. La técnica ha sido validada mediante diferentes escenarios de daño en vigas simuladas, logrando identificar con precisión la ubicación y severidad del daño. Se muestra que al multiplicar las ecuaciones de valores propios dañados con las formas modales correspondientes, se obtienen más ecuaciones que ayudan a garantizar la localización del daño. Sin embargo, las ecuaciones resultantes son más sensibles a las desviaciones en los datos modales, y la solución directa frecuentemente proporciona resultados insatisfactorios. Los resultados numéricos indican que el método de mínimos cuadrados no negativos puede ofrecer resultados satisfactorios en la mayoría de los casos. Además, se requiere un algoritmo de regularización con truncamiento basado en errores para asegurar soluciones precisas.

1.4.38. Un enfoque numérico para la detección de fallos en estructuras tipo viga utilizando energía de deformación modal [39].

La detección de daños basada en vibraciones se basa en la premisa de que las mediciones de los cambios en las propiedades de vibración de una estructura pueden ser utilizadas para identificar la ocurrencia de daños estructurales. Por lo tanto, es esencial desarrollar e implementar métodos para la detección de fallos y la ubicación óptima de sensores que consideren la limitación de la instrumentación y su impacto en la predicción de la degradación del daño.

En este estudio, se presentan los resultados de la implementación numérica de un método de distribución de sensores previamente desarrollado. Se utiliza un modelo de elementos finitos de un puente de cajón ferroviario. El método del índice de daño se aplica numéricamente para identificar el daño a partir de las mediciones de los sensores. Tanto la colocación óptima de los sensores como los métodos de detección de daño se fundamentan en el concepto de energía de deformación modal.

Los resultados numéricos demuestran que el enfoque propuesto es adecuado para aplicaciones de monitoreo continuo de daños y puede servir como una herramienta eficaz para la evaluación de daños en estructuras similares a vigas.

1.4.39. Predicción probabilística de la vida útil por fatiga de piezas agrietadas: Enfoque basado en la mecánica de fractura lineal elástica [40].

El estudio aborda la evaluación de la vida útil de piezas agrietadas mediante un enfoque probabilístico basado en la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM). Se enfoca en cuantificar la incertidumbre en los datos recopilados, como propiedades del material y mediciones de grietas, que influyen en el modelo de propagación de grietas. Se consideran tres tipos de incertidumbre: propiedades del material, geométricas y de carga. Se utilizan técnicas de pruebas de crecimiento de grietas y se comparan datos obtenidos mediante diferentes técnicas de medición, como TOFD y DIC. Un análisis de sensibilidad evalúa el impacto de estas incertidumbres en la predicción de la vida residual, y se utiliza información experimental para validar la precisión del modelo.

1.4.40. Detección de daños en estructuras tipo placa basada en cambios en los parámetros modales básicos [41].

La identificación de daños en estructuras es un componente fundamental en el monitoreo de la salud estructural. El daño se define como cualquier alteración en

la estructura que impacta su comportamiento futuro. Este estudio aborda el problema de identificación de daños en estructuras tipo placa, considerando tanto las propiedades materiales como geométricas. Se explora la posibilidad de identificar daños en una estructura al comparar los parámetros modales básicos en dos estados: el estado intacto y el estado dañado. La premisa central es que el daño modifica las propiedades físicas de la estructura, tales como rigidez y/o masa, lo que a su vez provoca cambios en los parámetros modales, incluidos las frecuencias naturales, las formas modales y los coeficientes de amortiguamiento. El objetivo de esta investigación es detectar daños en una placa de concreto armado a escala real con apoyo simple. Se aplicaron daños discretos o continuos en la zona de compresión de la placa utilizando un método de corte con sierra. En la primera fase del estudio, se emplearon parámetros dinámicos para detectar la presencia de daño. En una fase posterior, se evaluaron la ubicación y la severidad del daño. Las respuestas vibratorias se registraron mediante varios transductores, cuya disposición se modificó en diferentes etapas de las pruebas experimentales. La excitación se realizó utilizando un martillo de impacto. Los parámetros dinámicos se determinaron mediante análisis modal operacional. Se realizaron detecciones de daño tanto numéricas como experimentales en la placa de concreto armado, y los resultados obtenidos se compararon.

1.5. METODOLOGÍA

Describe los procesos necesarios para la realización del análisis estático, a continuación, se describen brevemente cada uno de ellos, en el capítulo 3: Metodología, se describen a profundidad.

Depuración de componentes no esenciales: Utilizar el software SolidWorks para eliminar componentes no esenciales de la plataforma, optimizando así la complejidad del modelo.

Definición de la geometría en LS-Dyna: Establecer la forma en que se trabajará la geometría del modelo depurado en LS-Dyna, asegurando que se adecúe a los requisitos del análisis FEM.

Corrección de la geometría existente: Realizar ajustes y correcciones necesarias en la geometría existente.

Selección y aplicación del mallado: Elegir el tipo de mallado adecuado para el modelo y aplicarlo correctamente, garantizando una representación precisa de la geometría y condiciones de carga.

Aplicación de contactos: Definir y aplicar los contactos necesarios entre los distintos componentes de la geometría para simular adecuadamente las interacciones y transferencias de carga.

Aplicación de límites y condiciones frontera: Establecer los límites y condiciones fronteras correspondientes para la geometría existente, asegurando que el modelo refleje fielmente las condiciones del entorno operativo.

Aplicación de cargas para casos A, B y C: Aplicar las cargas medidas experimentalmente para cada uno de los casos estudiados (A, B y C), asegurando una correcta representación de las condiciones de carga reales.

Solución del análisis: Ejecutar el análisis FEM utilizando LS-Dyna para resolver las ecuaciones y obtener los resultados de los esfuerzos en la plataforma.

Post- procesamiento de datos: Realizar el post- procesamiento de los datos obtenidos del análisis para extraer información relevante y preparar los resultados para su interpretación.

Interpretación de datos: Analizar e interpretar los datos obtenidos del post-procesamiento para determinar los esfuerzos máximos y la vida útil estimada de la plataforma Big Coil.

Este procedimiento metodológico permite una evaluación de la plataforma Big Coil, proporcionando información la optimización y mantenimiento preventivo del sistema.

1.6. CRONOGRAMA

La presente sección introduce el cronograma del estudio, el cual abarca el periodo desde octubre de 2022 hasta diciembre de 2023, cubriendo un total de 15 meses. Durante este intervalo, se ejecutarán diversas actividades planificadas. El cronograma ofrece una visualización detallada y estructurada de dichas actividades a lo largo del tiempo, facilitando la gestión y seguimiento del proyecto, figura 1.4.

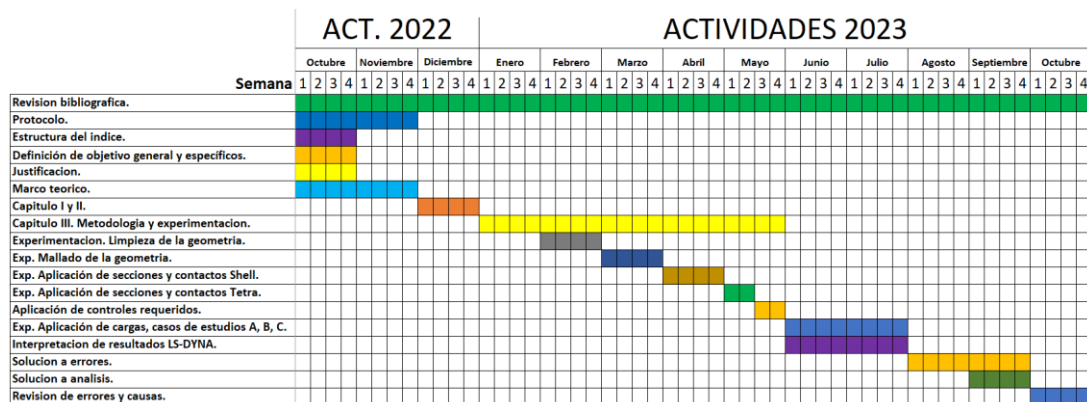


Figura 1.4. Actividades realizadas en los años 2022 y 2023.

Debido a los errores identificados, fue necesario reevaluar el alcance de la tesis y reforzar ciertas áreas de la misma. A continuación, se presenta el cronograma actualizado con las actividades realizadas durante el presente año, mostrado en figura 1.5.

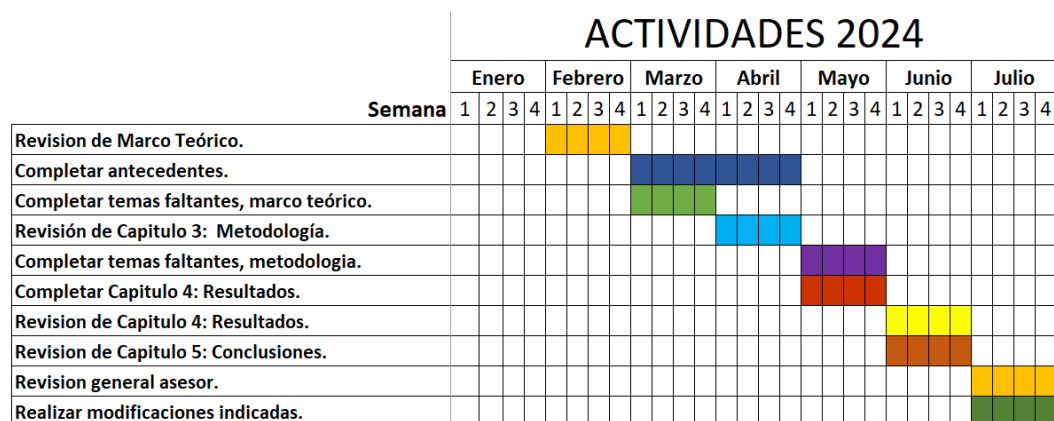


Figura 1.5. Actividades realizadas en el 2024.

1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.7.1 ALCANCES.

La presente tesis tiene como objetivo principal la estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil. Este estudio se realiza en la zona metropolitana de Monterrey, con el propósito de prevenir posibles daños y facilitar la realización de mantenimientos preventivos. La investigación abarca el periodo comprendido entre octubre de 2022 y diciembre de 2023.

Los resultados del estudio proporcionarán información valiosa para mejorar la gestión de mantenimiento y aumentar la durabilidad de la plataforma Big Coil.

1.7.2 LIMITACIONES.

La investigación se limita a un periodo de 15 meses, lo cual puede no ser suficiente para observar todos los posibles daños y el ciclo completo de vida de la plataforma.

Cantidad de piezas: La amplia cantidad de piezas involucradas en la plataforma Big Coil puede representar un desafío significativo para la recopilación y análisis de datos precisos.

Complejidad de los componentes: La complejidad de los componentes de la plataforma puede dificultar la identificación y evaluación de los posibles daños, así como la implementación de los mantenimientos preventivos necesarios.

Posibles errores en el análisis: Existen posibles errores que pueden surgir debido a los diferentes elementos presentes para efectuar el análisis.

1.8. CONTENIDO DE LA TESIS

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo proporciona una visión general del estudio, incluyendo la justificación y el contexto del proyecto. Se define el problema de investigación, que es la estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil, y se establecen los objetivos y la hipótesis del estudio. También se discute la importancia del problema y se presenta una breve descripción del alcance y las limitaciones del proyecto, así mismo se detallan los casos de estudio que se utilizaron como referencia. La introducción establece el marco para el desarrollo de la investigación y presenta los principales temas que serán abordados en los capítulos siguientes. El capítulo también incluye una revisión de estudios previos y literatura relevante sobre la estimación del ciclo de vida de plataformas industriales. Se analizan investigaciones similares y se identifican las principales contribuciones y limitaciones de estos estudios, proporcionando un contexto para posicionar el presente trabajo dentro del campo de investigación existente.

Capítulo 2: Marco Teórico

En el marco teórico se revisan y analizan los conceptos y teorías relevantes para el estudio. Este capítulo incluye una revisión de la literatura existente sobre la

estimación del ciclo de vida de plataformas industriales, así como la teoría subyacente a la metodología de elementos finitos (FEM) utilizada en el análisis. Se exploran conceptos clave como el análisis de vibraciones y la predicción de la vida útil de componentes mecánicos. Este marco proporciona el contexto necesario para comprender los fundamentos teóricos que sustentan la investigación y la metodología empleada.

Capítulo 3: Metodología

El capítulo de metodología describe detalladamente los procedimientos y técnicas utilizados para llevar a cabo la investigación. Se explica el proceso de depuración de la plataforma Big Coil en SolidWorks, la definición y corrección de la geometría en LS-Dyna, y la aplicación de mallado, contactos, límites, condiciones fronteras y cargas para los diferentes casos de estudio. Además, se detalla el proceso de análisis FEM, el post- procesamiento de datos y la interpretación de los resultados. Este capítulo proporciona una guía clara sobre cómo se realizaron los análisis y cómo se obtuvo la información necesaria para alcanzar los objetivos del estudio.

Capítulo 4: Resultados

En el capítulo de resultados se presentan los hallazgos obtenidos a partir del análisis FEM.

Capítulo 5: Conclusiones

El capítulo de conclusiones resume los principales hallazgos de la investigación y evalúa si los objetivos y la hipótesis del estudio fueron alcanzados. Además, se sugieren posibles recomendaciones para la mejora del diseño y la práctica, así como direcciones para futuras investigaciones. Este capítulo ofrece una reflexión final sobre el estudio y sus implicaciones prácticas y teóricas.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico que sustenta la investigación sobre la estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil. El objetivo es proporcionar un contexto conceptual y una base sólida a partir de la cual se desarrollarán y analizarán los hallazgos de este estudio.

El marco teórico se estructura en varias secciones clave. En primer lugar, se revisan los conceptos fundamentales relacionados con el análisis de elementos finitos (FEM) y su aplicación en la evaluación de estructuras sometidas a vibraciones. Esta revisión incluye una exploración de la teoría de vibraciones mecánicas y su relevancia para la predicción de esfuerzos y vida útil de componentes industriales.

Finalmente, se presenta una síntesis de las teorías y conceptos que informan la metodología utilizada en esta investigación. Esta síntesis no solo establece la base teórica para los análisis posteriores, sino que también justifica la elección de las herramientas y técnicas empleadas en el estudio.

2.1 VIBRACIÓN.

Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad son capaces de vibrar y puede ser afectado por eventos de choque. La vibración es un movimiento oscilatorio alrededor de un punto de equilibrio. El choque mecánico es un cambio repentino de aceleración que generalmente excita la resonancia de una estructura. Un evento de choque es básicamente un tipo de vibración donde la excitación es no periódica; gran parte de la configuración de prueba y análisis entre las pruebas

de choque es similar a las pruebas de vibración. Además, la tendencia de los eventos de choque a inducir una respuesta vibratoria en la estructura hace que valga la pena discutir las pruebas de choque y vibración juntas. Los choques mecánicos y las vibraciones se han vuelto muy presentes en la vida cotidiana, por lo que medir y comprender su impacto en su sistema es una parte importante del diseño mecánico.[42][43]

2.2 FALLA POR FATIGA.

Con frecuencia, se observa que los componentes de máquinas fallan debido a esfuerzos repetidos o fluctuantes. Sin embargo, análisis detallados muestran que los esfuerzos máximos aplicados estaban por debajo de la resistencia última del material y, a menudo, incluso por debajo de la resistencia a la fluencia. La característica distintiva de estas fallas es la repetición de los esfuerzos un gran número de veces. Por esta razón, dichas fallas se denominan fallas por fatiga.

La fatiga se manifiesta a través de la formación y propagación de grietas en los materiales. Generalmente, una grieta de fractura se inicia en una discontinuidad del material donde el esfuerzo cíclico es más intenso. Las discontinuidades pueden surgir por diversas razones:

Diseños que implican cambios abruptos en la sección transversal, como cuñeros y orificios, donde se producen concentraciones de esfuerzo.

Elementos en rotación y/o deslizamiento mutuo (cojinetes, engranajes, levas, etc.) bajo alta presión constante, lo que genera esfuerzos de contacto concentrados subsuperficiales, causando eventualmente picaduras o astilladuras tras numerosos ciclos de carga.

Deficiencias en el proceso de fabricación, tales como ubicaciones de estampados, marcas de herramientas, raspaduras y rebabas; diseño inadecuado de juntas; ensamblaje incorrecto y otros errores de manufactura.

La propia composición del material post-procesamiento (laminado, forjado, fundido, estirado, calentado, etc.), que puede introducir discontinuidades microscópicas y submicroscópicas en la superficie o debajo de ella, así como inclusiones de materiales extraños, segregaciones de aleación, vacíos, precipitaciones de partículas duras y discontinuidades cristalinas.

Varias condiciones pueden acelerar el inicio de la grieta, incluyendo altas temperaturas, ciclos térmicos, ambientes corrosivos y ciclos de alta frecuencia. La velocidad y dirección de la propagación de la grieta por fatiga están principalmente controladas por los esfuerzos localizados y la estructura del material en el área afectada. No obstante, factores como el entorno, la temperatura y la frecuencia también pueden influir significativamente. Como se ha mencionado, las grietas tienden a crecer a lo largo de planos perpendiculares a los esfuerzos de tensión máximos. [44]

2.3 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO [45].

Existen numerosas técnicas numéricas empleadas en aplicaciones de ingeniería donde la computadora digital resulta sumamente útil. En el diseño mecánico, el uso extensivo de software de diseño asistido por computadora (CAD) se complementa de manera ideal con el método de análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés). La teoría y las aplicaciones matemáticas de este método son vastas. Además, hay una variedad de paquetes de software comerciales de FEA disponibles, como ANSYS, entre otros.

En el análisis de elementos finitos (FEA), una estructura mecánica real se considera como un continuo elástico, que se discretiza en subestructuras más pequeñas y finitas denominadas elementos. Estos elementos, caracterizados por sus propiedades geométricas y materiales específicos, se modelan utilizando funciones polinomiales y operaciones matriciales para simular el comportamiento elástico de manera continua.

Las cargas aplicadas a estos elementos pueden ser internas (como la gravedad y dinámicas) o externas (como las térmicas), y se pueden introducir en los nodos o superficies de los elementos. Los nodos actúan como puntos clave en el análisis estructural, interconectando los elementos y asignando propiedades elásticas, condiciones de frontera, y fuerzas aplicadas. Cada nodo dispone de grados de libertad, tanto rotacionales como traslacionales, permitiendo hasta tres de cada tipo, que facilitan la representación de movimientos independientes.

En el modelo de elementos finitos, los elementos se ensamblan a nivel global a través de sus nodos compartidos, formando una matriz de sistema global. Las condiciones de frontera y las cargas aplicadas se especifican, y por medio de operaciones matriciales se resuelven los desplazamientos en los grados de libertad desconocidos. Con estos desplazamientos calculados, es posible determinar las tensiones y deformaciones en la estructura utilizando las ecuaciones constitutivas de la teoría de elasticidad.

2.4 GEOMETRÍAS DEL ELEMENTO.

En el contexto del análisis por elementos finitos (FEA), se aplican diversas configuraciones geométricas de elementos para adaptarse a requerimientos específicos de diferentes aplicaciones. Los programas de software FEM de uso general integran estas configuraciones dentro de lo que se denomina la biblioteca de elementos del programa. Estos elementos se organizan en categorías definidas, incluyendo elementos lineales, elementos de superficie, elementos sólidos, y elementos diseñados para aplicaciones especializadas, permitiendo así una selección precisa del elemento adecuado en función de las necesidades específicas del análisis estructural o mecánico, mostrado en la Figura 2.1.

Tipo de elemento	Ninguno	Forma	Número de nodos	Aplicaciones
Línea	Puntal		2	Barra con extremos articulados en tensión o compresión
	Viga		2	Flexión
	Armazón		2	Axial, torsional o de flexión Con o sin rigidez de carga
Superficie	Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
	Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión
	Triangular de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
	Triangular de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
Sólido†	Hexagonal de 8 nodos (paralelepípedo o ladrillo)		8	Sólido, placa gruesa
	Pentagonal de 6 nodos (cuña)		6	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
	Tetraedro de 4 nodos (tetra)		4	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
Propósito especial	Brecha		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos
	Gancho, conexión		2	Desplazamientos libres para espacios preestablecidos
	Rígido		Variable	Restricción rígida entre nodos

Figura 2.1. Tipos de configuraciones geométrías de elementos.

2.5 GENERACIÓN DE FALLA.

La estructura de malla, constituida por una red de elementos y nodos que discretizan una región, es crucial en el método de análisis por elementos finitos (FEA). La densidad de esta malla aumenta con la inclusión de más elementos en una región determinada. Un proceso conocido como refinamiento de malla se implementa para mejorar los resultados de un análisis a otro, ajustando la malla para incrementar su densidad especialmente en áreas con altos gradientes de esfuerzo o en transiciones geométricas. Generalmente, la precisión de los resultados de FEA mejora con este incremento en densidad de malla y tiende a converger hacia soluciones más exactas mediante refinamientos sucesivos.

Para verificar la efectividad del refinamiento, puede remallarse una estructura en áreas de altos gradientes de esfuerzo con una densidad incrementada. Si se observa poco cambio en el valor máximo de esfuerzo tras este ajuste, se puede considerar que la solución ha alcanzado la convergencia. La generación de la malla puede realizarse de tres maneras: manual, semiautomática o completamente automatizada. La generación manual, común en las etapas iniciales del desarrollo del método FEA, es un proceso intensivo que se emplea raramente hoy día, salvo para modificaciones menores en el modelo. Es importante notar que, al editar manualmente el archivo de texto de entrada en ciertos softwares de FEA, otros archivos como los gráficos binarios del preprocesador pueden no actualizarse, lo que podría resultar en incompatibilidades entre los archivos.

La automatización completa de la generación de mallas ha capturado el interés de la mayoría de los proveedores de software, orientando sus desarrollos hacia sistemas de generación y refinamiento de mallas totalmente automáticos y auto adaptativos. Este enfoque busca reducir significativamente tanto el tiempo dedicado al preprocesamiento por parte del modelador como el esfuerzo

requerido para obtener una malla de análisis por elementos finitos (FEA) adecuadamente configurada.

Tras definir completamente los límites o contornos de la estructura sin necesidad de subdivisiones manuales, como es el caso en la generación de mallas semiautomáticas, y minimizando la intervención del usuario, se disponen de varios métodos para discretizar la región empleando un tipo de elemento específico. En situaciones de problemas elásticos planos, los contornos se establecen utilizando una serie de líneas geométricas internas y externas, seleccionando automáticamente elementos planos elásticos para la malla. En el caso de estructuras de paredes delgadas, se utilizan representaciones superficiales tridimensionales para definir la geometría, y los elementos de placa tridimensionales son seleccionados automáticamente para la malla. Para estructuras volumétricas, las fronteras pueden ser modeladas usando técnicas de geometría sólida constructiva (CSG) o representaciones de frontera, y los elementos finitos empleados en la malla automática incluirían paralelepípedos y/o tetraedros.

Además, los sistemas de refinamiento automático y auto adaptativo evalúan el error en la solución de FEA. Basándose en este error, la malla se ajusta y reanaliza automáticamente. Este ciclo de evaluación y ajuste continúa hasta alcanzar un punto de convergencia o satisfacer un criterio predefinido de finalización.

2.6 APLICACIÓN DE CARGA.

En el análisis estructural, las cargas pueden especificarse de dos maneras fundamentales: a través de cargas nodales y de cargas distribuidas sobre los elementos. Sin embargo, es importante señalar que las cargas aplicadas a los elementos son finalmente traducidas en cargas nodales equivalentes por medio de transformaciones adecuadas. Este proceso está alineado con el principio de

Saint-Venant, el cual sostiene que los detalles de la distribución de carga son menos críticos lejos de las áreas de aplicación de carga, siempre y cuando la suma de las fuerzas y/o momentos se mantenga constante.

Aplicar directamente una fuerza neta o un momento a un único nodo es práctico, siempre que los elementos conectados a dicho nodo posean los grados de libertad necesarios para soportar dichas cargas. A pesar de esto, es esperable observar esfuerzos significativamente altos en las proximidades del punto de carga, lo cual no debería ser motivo de alarma para el analista.

En cuanto a los momentos concentrados, estos pueden ser aplicados a los nodos de elementos estructurales como vigas y la mayoría de elementos de placa. No obstante, ciertos elementos como los puntales, elementos planos elásticos bidimensionales, axiales simétricos o de tipo ladrillo, carecen de la capacidad para soportar grados de libertad rotacionales. En estos casos, la aplicación de momentos puros debe realizarse mediante la creación de un par de fuerzas. Este par se configura aplicando dos o más fuerzas en un plano de manera que la fuerza neta sea cero y el momento resultante sea perpendicular a dicho plano, sumando los momentos individuales en un punto arbitrario común.

Las cargas que se aplican sobre los elementos pueden incluir efectos de cargas estáticas por gravedad, influencias térmicas, cargas superficiales como presión hidrostática y uniforme, así como cargas dinámicas resultantes de aceleraciones constantes o de rotación en estado estacionario, como la aceleración centrífuga. Estas cargas de elementos se convierten en cargas nodales equivalentes mediante software específico, tratándose finalmente como cargas concentradas aplicadas a los nodos.

2.7 CONDICIONES DE FRONTERA.

La modelación de condiciones de frontera y otras restricciones constituye uno de los aspectos más complejos en el modelado preciso para análisis por elementos

finitos. La especificación de estas restricciones es propensa a errores de omisión o inexactitudes. Los analistas pueden necesitar experimentar con diversas metodologías para representar restricciones complejas, como uniones atornilladas o soldaduras, que no se ajustan fácilmente a modelos de uniones fijas o pernos idealizados. Es recomendable limitar estas pruebas a situaciones simplificadas en lugar de aplicarlas directamente a estructuras amplias y complejas.

En ciertos casos, cuando la naturaleza precisa de una restricción o condición límite es desconocida, solo es posible determinar rangos de comportamiento esperado. Por ejemplo, los ejes apoyados en cojinetes se han modelado frecuentemente utilizando supuestos de soporte simple. Aunque es más probable que el soporte real fluctúe entre un soporte simple y uno fijo, analizar ambos escenarios podría ayudar a establecer un rango de comportamiento. Sin embargo, al adoptar la suposición de un soporte simple, los resultados tienden a ser conservadores, es decir, prediciendo niveles de esfuerzos y deflexiones superiores a los que realmente se presentarían.

2.8 ANÁLISIS DE VIBRACIÓN.

El análisis de vibraciones mecánicas se reconoce en el ámbito industrial como una técnica de mantenimiento esencial. Esta práctica permite identificar el inicio de posibles averías o fallas ya desarrolladas, además de proporcionar las herramientas necesarias para analizar la causa subyacente del problema. Muchas empresas emplean esta técnica para determinar el momento óptimo para corregir de manera eficaz y eficiente cualquier problema detectado. Actualmente, esta tecnología predictiva se considera la mejor alternativa para evaluar el estado mecánico de las máquinas.[47]

2.9 PRUEBAS DE VIBRACIÓN.

Para superar las limitaciones del análisis de la forma de onda, una práctica común es realizar un análisis de frecuencias, también conocido como análisis de espectro de la señal de vibración. La representación gráfica en el dominio del tiempo se denomina forma de onda, mientras que la gráfica en el dominio de la frecuencia se conoce como espectro. El análisis espectral consiste en transformar la información de la señal desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, mostrado en la figura 2.2 [48]

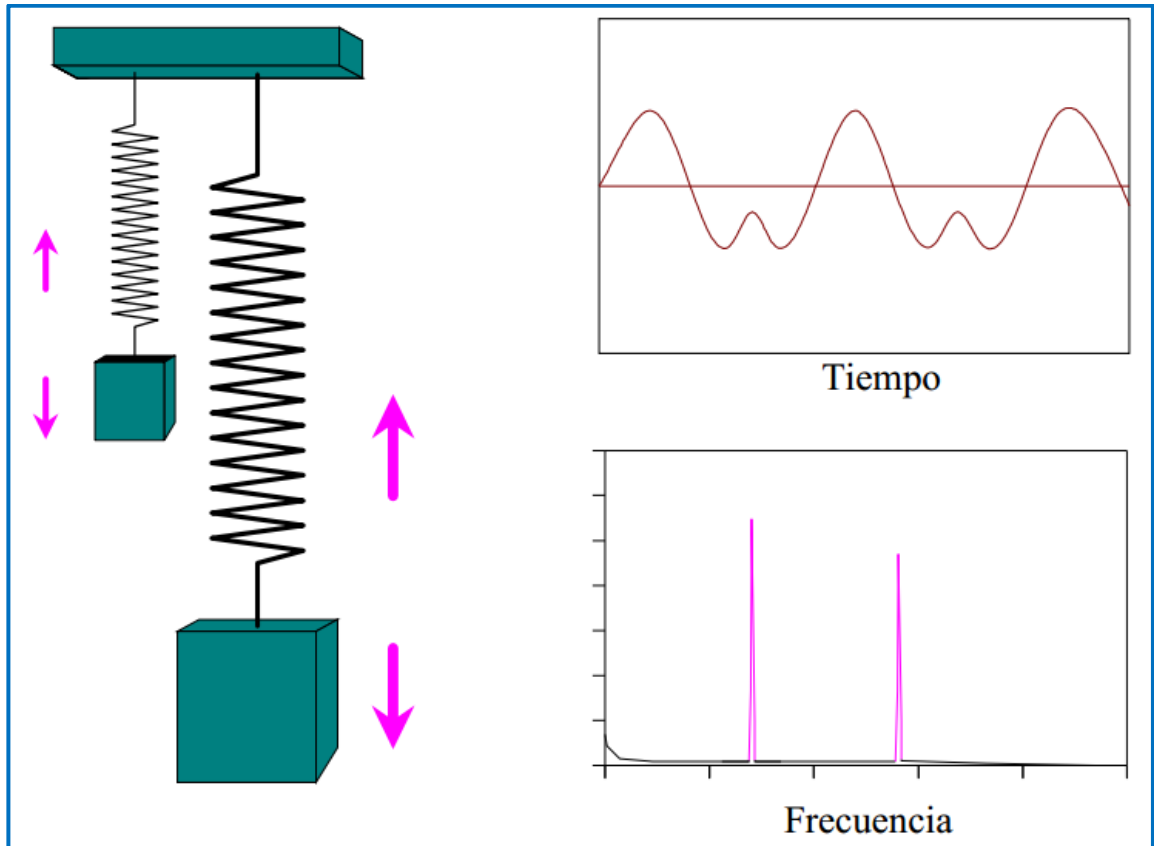


Figura 2.2. Dominio de tiempo vs dominio de frecuencia.

En la figura 2.3 siguiente, se observa que algunos eventos superpuestos y confusos en el dominio del tiempo se separan en sus componentes individuales en el dominio de la frecuencia. La forma de onda de vibración encierra una gran

cantidad de información que no es evidente a simple vista. Parte de esta información reside en componentes de muy bajo nivel, cuya magnitud puede ser tan pequeña que no se distinga claramente en la gráfica de la forma de onda. Sin embargo, estos componentes de bajo nivel pueden ser cruciales, ya que podrían indicar un problema incipiente, como una falla en un rodamiento. La esencia del mantenimiento predictivo radica en la detección temprana de fallas incipientes, por lo que es fundamental ser sensible a valores muy pequeños en las señales de vibración, como se analizará a continuación.

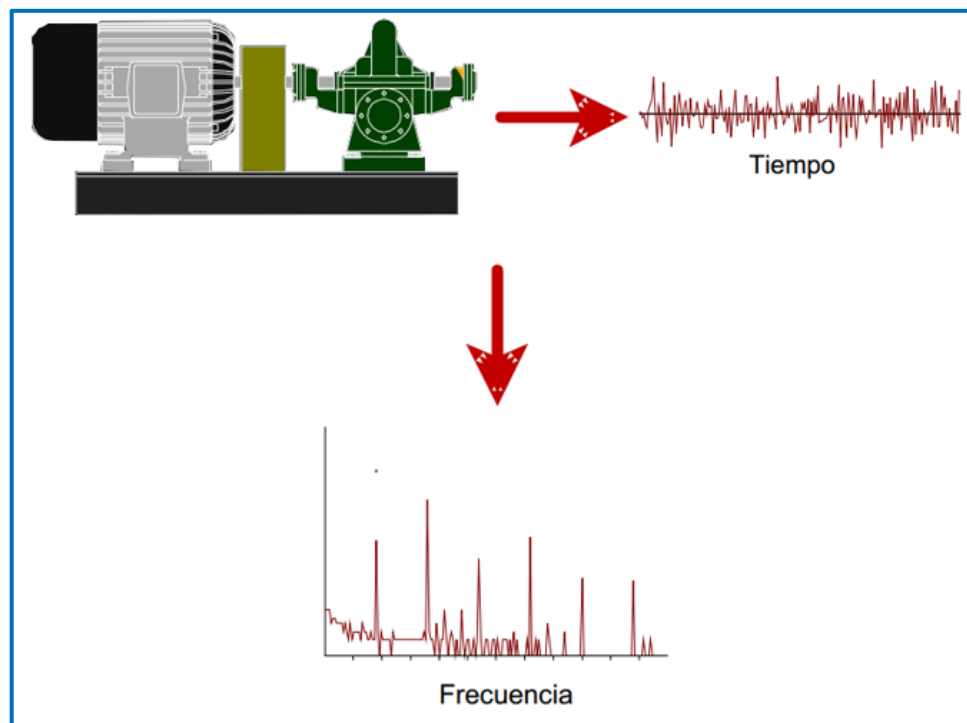


Figura 2.3. Ejemplo de dominio de tiempo vs dominio de frecuencia.

2.10 VIBRACION RANDOM.

Si los parámetros de respuesta a la vibración de un sistema dinámico se conocen con exactitud y pueden describirse como funciones del tiempo, se considera que la vibración es determinista. No obstante, en numerosos sistemas, las respuestas

de los procesos no pueden preverse con precisión, siendo estos denominados procesos aleatorios, figura 2.4.

Ejemplos de procesos aleatorios incluyen fenómenos como la turbulencia, la fatiga de materiales, el acoplamiento de engranajes imperfectos, las irregularidades superficiales, el movimiento de un vehículo sobre un terreno irregular y las vibraciones estructurales inducidas por terremotos.

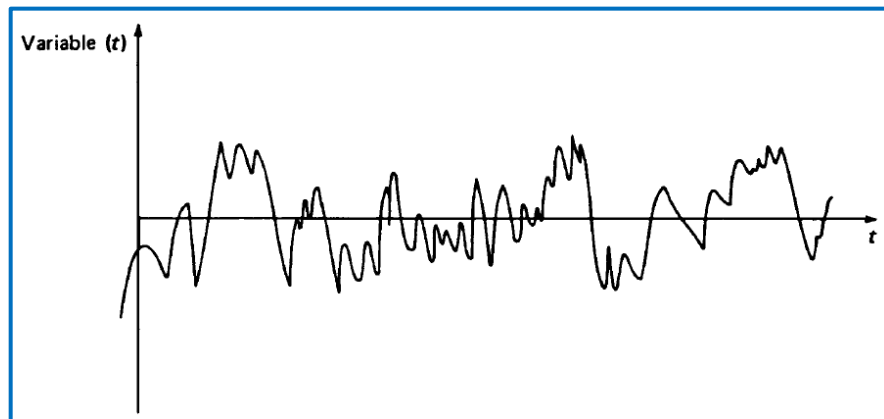


Figura 2.4. Ejemplo de variable aleatoria de proceso en función de t .

En conclusión, el marco teórico proporciona una base sólida para la comprensión y contextualización del estudio sobre la estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil. A través de la revisión de la literatura y el análisis de conceptos fundamentales, se ha establecido la importancia del análisis de elementos finitos (FEM) y su aplicación en la evaluación de estructuras sometidas a vibraciones.

Este marco teórico no solo justifica la elección de las herramientas y técnicas empleadas en la investigación, sino que también sienta las bases para la interpretación y análisis de los resultados que se presentarán en los capítulos subsiguientes. En resumen, la integración de estos conocimientos teóricos es fundamental para alcanzar los objetivos del estudio y proporcionar soluciones

prácticas y efectivas en el ámbito del mantenimiento industrial de la plataforma Big Coil.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

En esta sección se describe detalladamente la metodología empleada para llevar a cabo el estudio de estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil. La metodología es un componente crucial de la investigación, ya que define los procedimientos y técnicas específicos utilizados para recopilar, analizar e interpretar los datos necesarios para alcanzar los objetivos del estudio.

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación combina herramientas de análisis de elementos finitos (FEM) y técnicas de modelado geométrico para evaluar las respuestas de la plataforma Big Coil bajo diferentes condiciones de carga y vibración.

La metodología se organiza en varias etapas clave, que incluyen la depuración y preparación del modelo geométrico en SolidWorks, la definición y corrección de la geometría en LS-Dyna, la aplicación de mallado y condiciones fronteras, y la implementación de cargas experimentales. Cada una de estas etapas se describe en detalle, explicando los procedimientos específicos y las razones detrás de su elección.

3.1 PREPOCESAMIENTO.

Este proceso describe las operaciones requeridas para preparar la plataforma para el análisis estático. Las etapas del preprocesamiento abarcan la importación, simplificación y depuración de la geometría CAD, la generación de mallas de elementos finitos, la especificación de cargas y condiciones de contorno, y la determinación de los parámetros de solución.

3.2 LIMPIEZA DE LA GEOMETRÍA.

En este primer paso se realiza la limpieza de la geometría en la cual consiste en quitar los componentes no necesarios, ya sea accesorios, recubrimientos, dejando solamente el bastidor la estructura principal, estos cambios fueron realizados en el software Solid-Works.

A continuación, se muestra en la figura 3.1, la ingeniería completa de la plataforma Big-Coil.

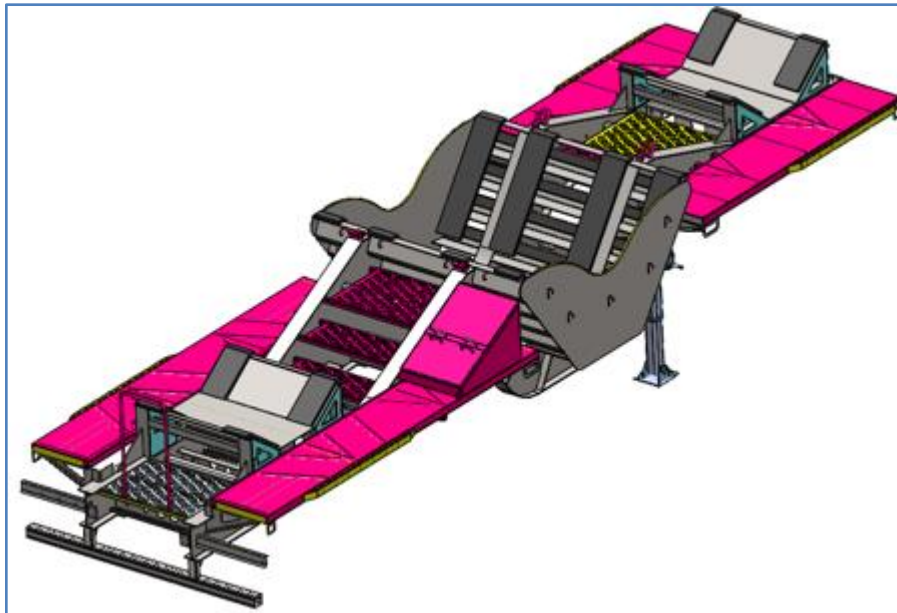


Figura 3.1. Plataforma Big Coil.

En este proceso solo se requiere la estructura principal para el análisis por lo que se eliminan los siguientes elementos no necesarios: soportes estacionarios, cajas, placas para peatones, barandales, estructurales laterales, se muestra en la figura 3.2.

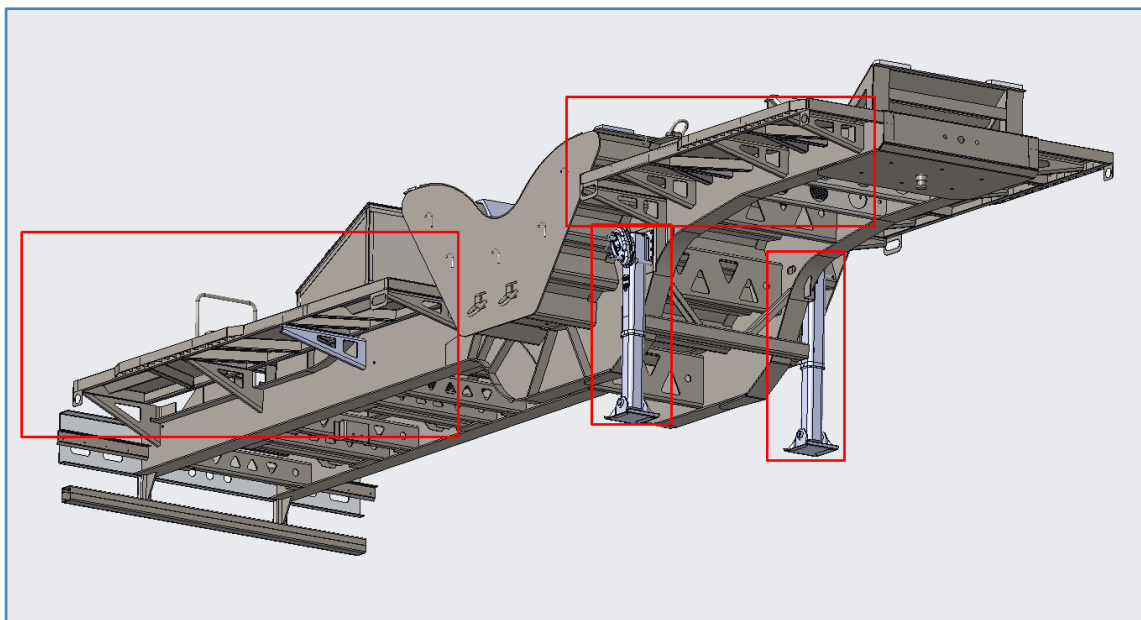


Figura 3.2. Elementos eliminados, vista inferior.

En la siguiente figura 3.3, se muestra por la vista superior los componentes eliminados los cuales son: caja para herramientas, soportes y placas para peatones, barandales.

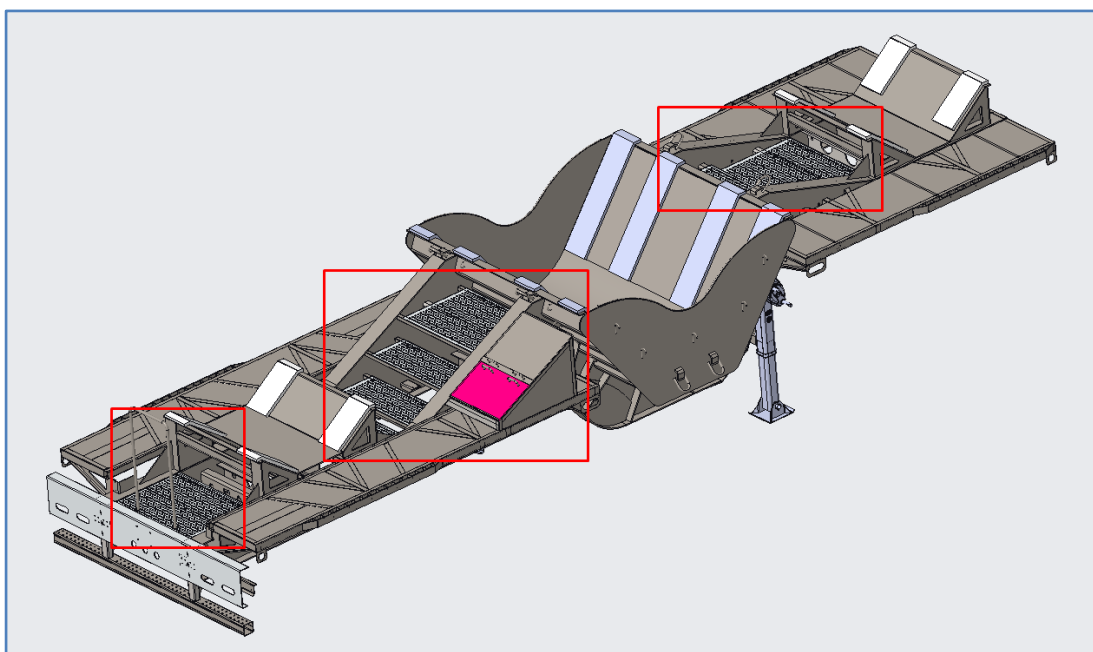


Figura 3.3. Elementos eliminados, vista superior.

Por ultimo se eliminan los plásticos usados para el contacto del rollo con la estructura y elementos de agarre, en la figura 3.4.

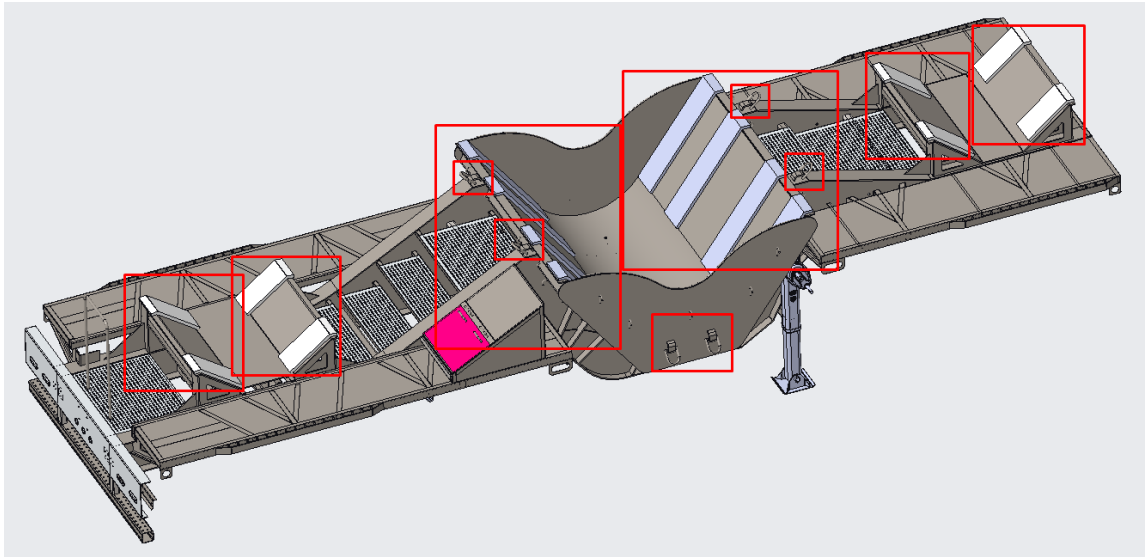


Figura 3.4. Elementos eliminados, vista superior.

En la figura 3.5, se muestra la estructura con los cambios realizados necesarios para el preprocesamiento.

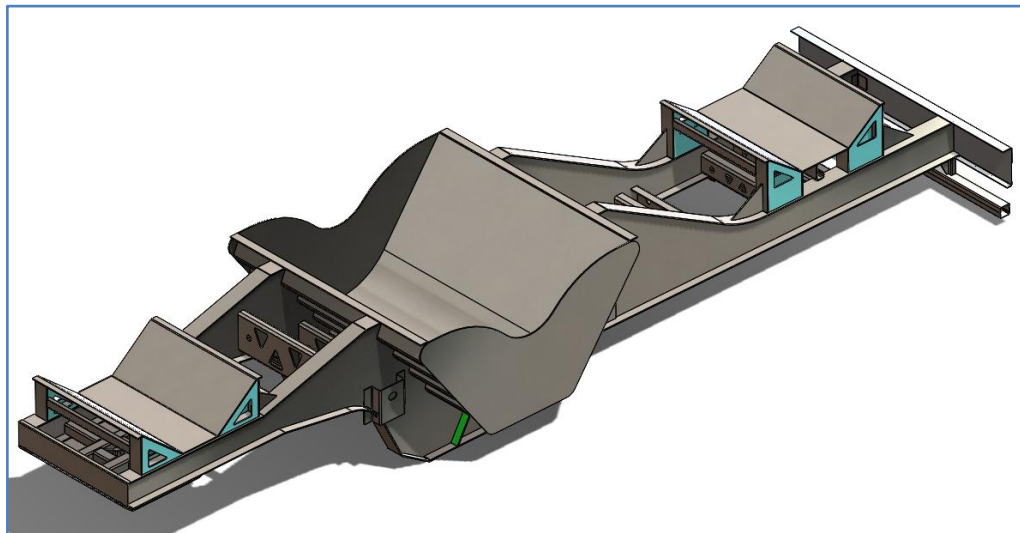


Figura 3.5. Estructura con la limpieza aplicada de la Plataforma Big Coil.

Se procede a realizar el cambio de nombre a cada componente de este bastidor, así como su espesor que será necesario para su procesamiento, esto se realiza para tener un control al momento de realizar el análisis ya que se cuenta con una gran cantidad de componentes y para la asignación de espesor en los materiales, mostrado en la figura 3.6.

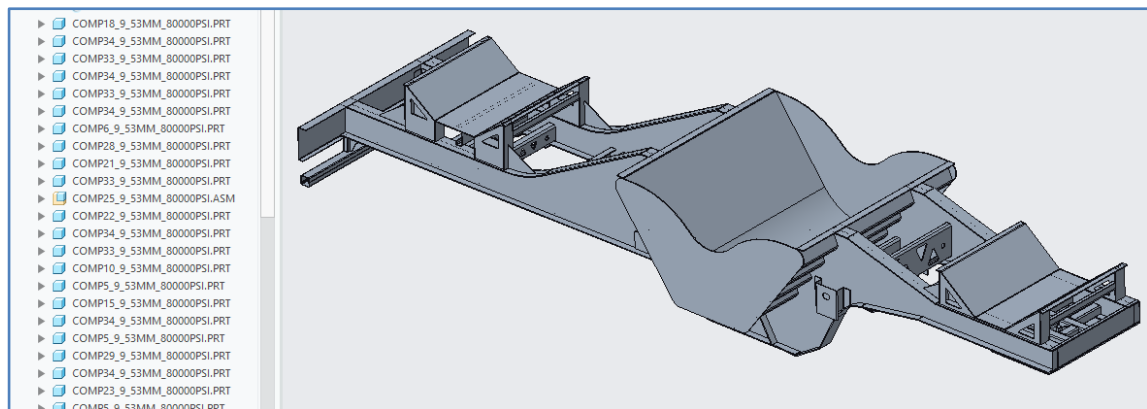


Figura 3.6. Cambio de nombre a cada componente.

3.1 PROCESAMIENTO.

El proceso comienza con la creación de una representación geométrica del objeto realizado en el preprocesamiento a continuación, el software divide esta representación en pequeñas secciones geométricas simples, denominadas elementos, que se conectan en puntos llamados nodos. Este procedimiento de fragmentación del modelo en múltiples partes pequeñas se denomina mallado. Los programas que emplean el método de elementos finitos analizan el modelo como una red de elementos conectados entre sí.

Este proceso describe las operaciones requeridas para la realización del análisis estático, las operaciones son las siguientes: aplicación de malla, aplicación de sección, aplicación de contactos, aplicación de condiciones de frontera, aplicación de controles.

Una vez que se tiene la ingeniería pasada con los cambios previstos anteriormente, se cambia al software LS-Dyna.

Para la primera parte se divide el análisis en dos elementos “shell” y “tetraédricos”, ya que contamos con la mayor parte de placas de varios espesores en los que usara metodología “shell” y elementos irregulares en los cuales usaremos metodología de elementos “tetraédricos”.

Como se mencionaba previamente para la mayoría de componentes son tipo placa donde solo varia el espesor, contamos con varios espesores de 3/8" y 1/2", en los cuales se aplicará para resolver elementos "shell".

En la siguiente figura 3.7 se muestra el trabajo realizado para dejar solo el plano medio de las placas que son los elementos "shell",

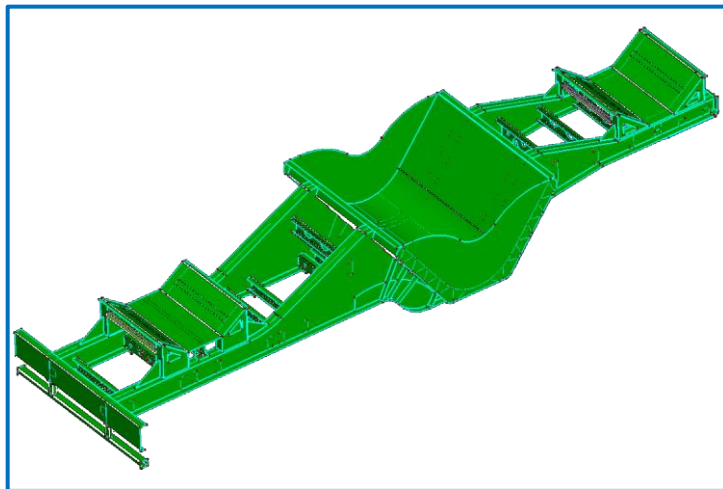


Figura 3.7. Plano medio para componentes de espesor regular.

Para los elementos que son irregulares no se modifican ya que son elementos solidos y se trabajaran como elementos "tetraédricos".

En la figura 3.8 siguiente se muestra ejemplos de los elementos mencionados.

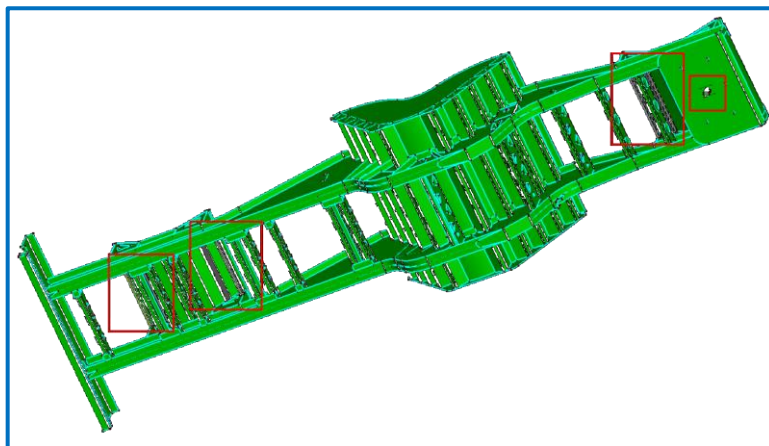


Figura 3.8. Componentes solidos en elementos irregulares.

En la figura 3.9 siguiente se muestra un ejemplo de las diferencias entre los elementos mencionados.

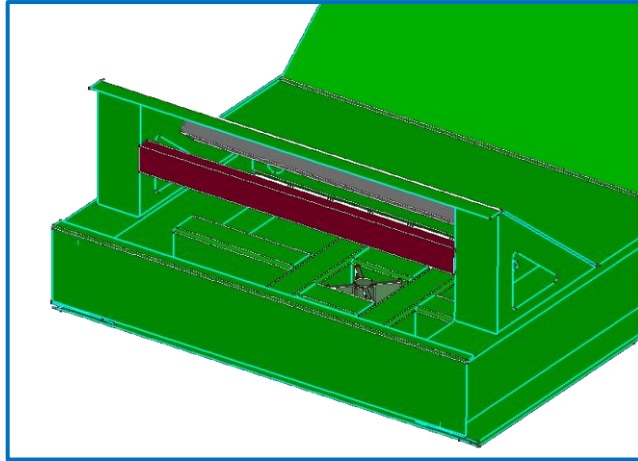


Figura 3.9. Diferencias entre componentes sólidos y de plano medio.

3.2 MALLADO.

Para esta siguiente parte del proceso generara un mallado de cada componente, hay que tomar en cuenta que cada elemento requiere un mallado distinto.

Se realiza la generación del mallado, utilizando el comando de malla automática, este comando genera automáticamente la malla reconociendo entre elementos solidos y elementos de vaciado, mostrado en la figura 3.10.

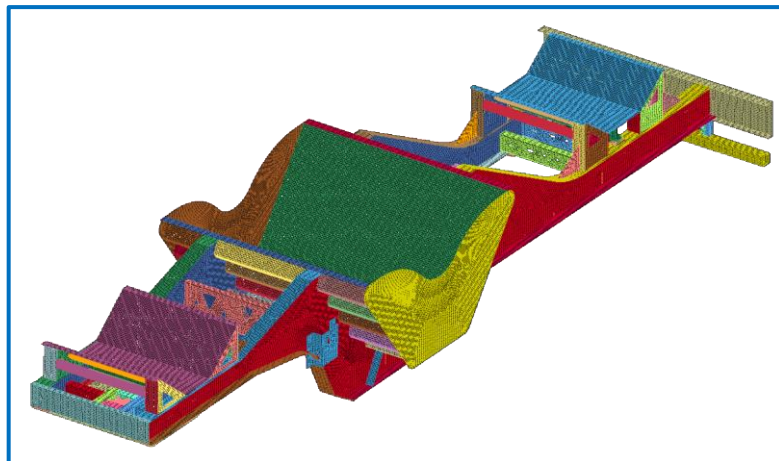


Figura 3.10. Malla generada.

A continuación, se muestran las diferencias entre los diferentes tipos de mallado en la figura 3.11.

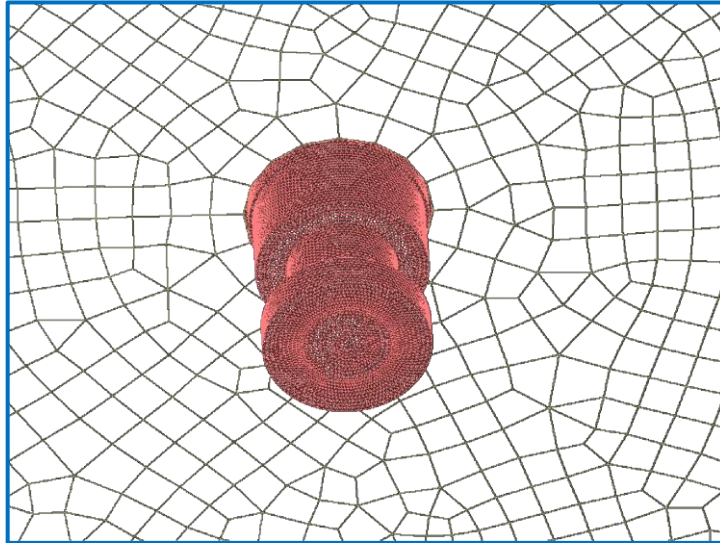


Figura 3.11. Diferencias en la generación de malla en elementos shell y tetraédricos.

Contando con los siguientes elementos:

Un total de 150 elementos tipo Shell y 6 elementos tipo tetra.

ELEMENTOS SHELL, 1 - 154

ELFORM=2: (Belytschko-Tsay), punto único de integración, comportamiento elástico lineal, eficiente y robusta bajo grandes deformaciones.

ELEMENTOS TETRAEDRICOS, 155 - 164

ELFORM=13: Solido lineal, de esfuerzo constante con promediado de presión nodal.

3.3 APLICACIÓN DE SECCIÓN.

En esta sección se aplican las características al material usado en la construcción, figura 3.12.

MID	RO	E	PR	DA	DB	NOT USED
1	7.830e-06	207.00000	0.3000000	0.0	0.0	0.0

Figura 3.12. Características aplicadas al material.

Como existen 2 espesores se aplican dos configuraciones para los elementos tipo Shell, serian para los espesores de 3/8" y 1/2", figura 3.13.

SECID	ELFORM	SHRE	NIP	PROPT	QS/RID	ICOMP	SETYP
1	2	1.0	2	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOE	EDGSET
9.525	9.525	9.525	9.525	0.0	0.0	0.0	0

SECID	ELFORM	SHRE	NIP	PROPT	QS/RID	ICOMP	SETYP
2	2	1.0000000	2	1	0	0	1
T1	T2	T3	T4	NLOC	MAREA	IDOE	EDGSET
12.700000	12.700000	12.700000	12.700000	0.0	0.0	0.0	0

Figura 3.13. Diferentes tipos de elementos Shell con espesores 3/8" y 1/2".

A continuación, en la figura 3.14, se aplica la configuración a cada componente aquí nos servirá el nombre que al principio designamos.

PID	SECID	MID	EOSID	HGID	GRAV	ADPOPT	TMID
1	1	0	0	0	0	0	0

Figura 3.14. Aplicación de cada configuración a cada elemento.

3.3 APLICACIÓN DE CONTACTOS.

El contacto es la forma en que se gestiona el contacto entre vigas y el contacto en los bordes de los elementos shell.

Se investigo un contacto que pudiera unir todos los nodos, se decidió por el comando “Automatic Surface to Surface Contact” que define el contacto entre superficies de un conjunto de elementos shell y tetraédricos, mostrado en la figura 3.15 y 3.16.

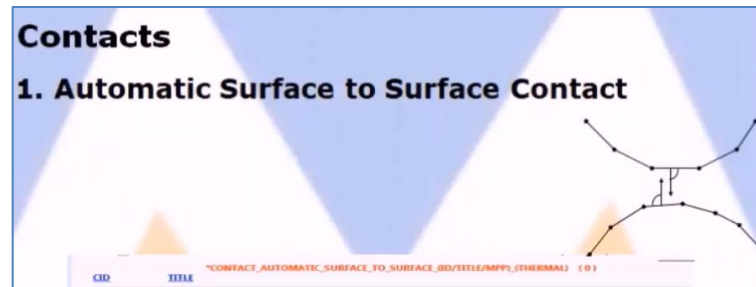


Figura 3.15. Contacto utilizado.

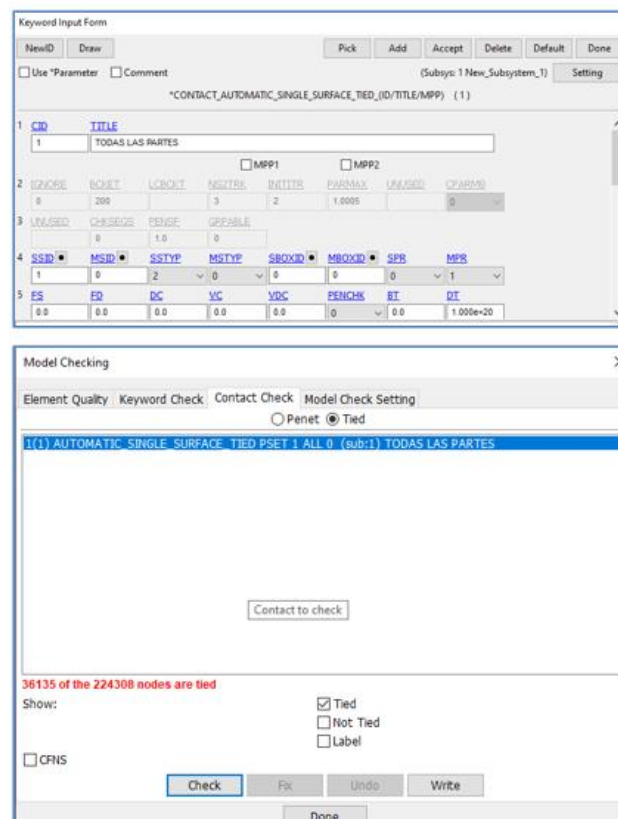


Figura 3.16. Aplicación de contacto.

Se realiza comprobación de la aplicación de contactos realizada mediante un “contact check”, este comando realiza un chequeo de todos nodos con los que se realizó un contacto entre nodos, mostrado en la figura 3.17 y 3.18.

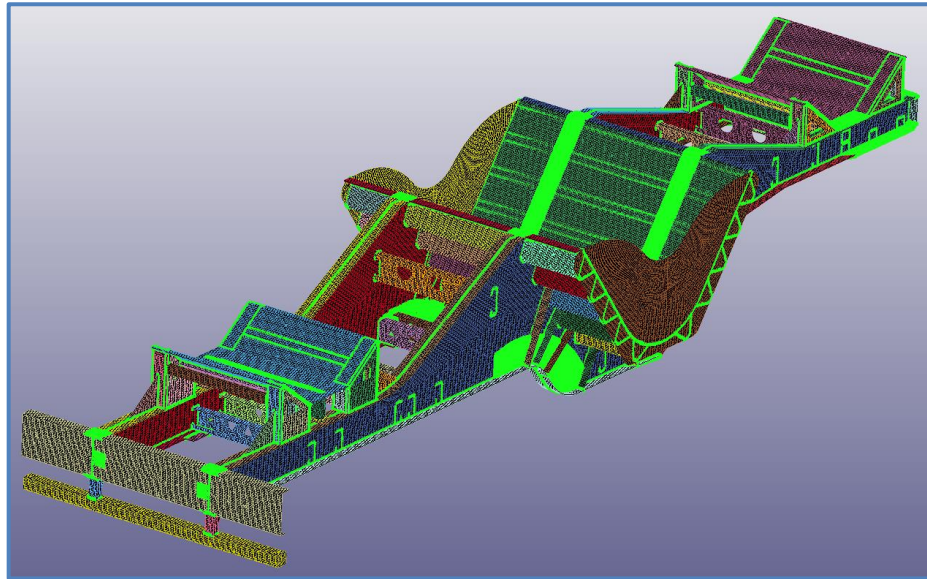


Figura 3.17. Comprobación de contactos, vista superior.

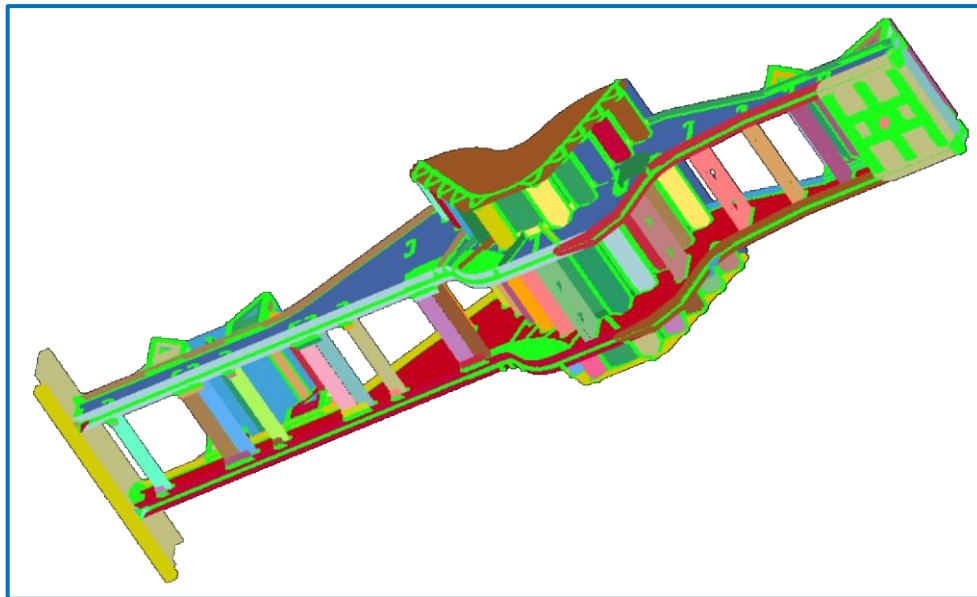


Figura 3.18. Comprobación de contactos, vista inferior.

Los resultados generados por el comando previo son correctos, evidenciando la conexión de los nodos en ciertas zonas de la plataforma. Esta configuración puede verificarse físicamente, ya que corresponde al método de fabricación empleado, como se aprecia en las áreas de soldadura.

3.4 APLICACIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA.

Las condiciones de frontera simulan los puntos de apoyo y/o agarre de la estructura contra el camión.

Lo primero que se realizó fue simular los soportes, esta geometría se exporta de la geometría inicial, no forman parte del análisis, mostrados en la figura 3.19.

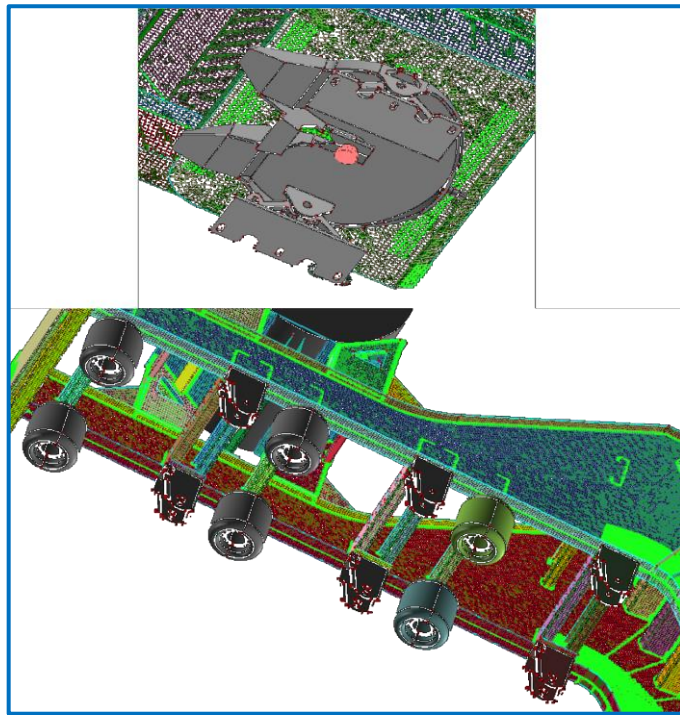


Figura 3.19. Soportes simulados.

El siguiente paso es seleccionar el área donde los nodos harán contacto, los nodos se seleccionan de forma manual figura 3.20, y en la figura 3.21 se muestra la lista de los sets creados.

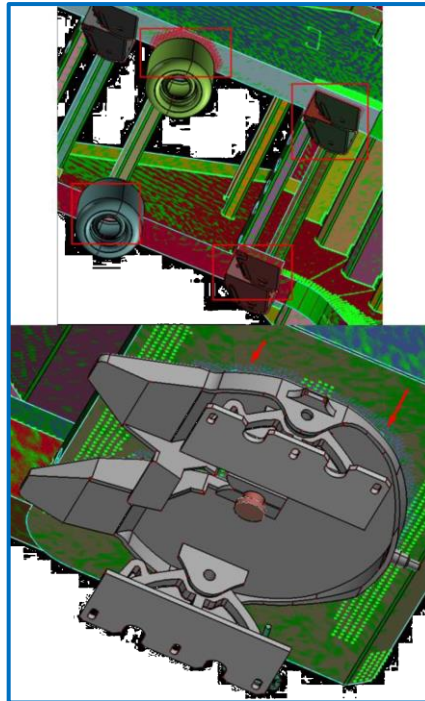


Figura 3.20. Áreas creadas.

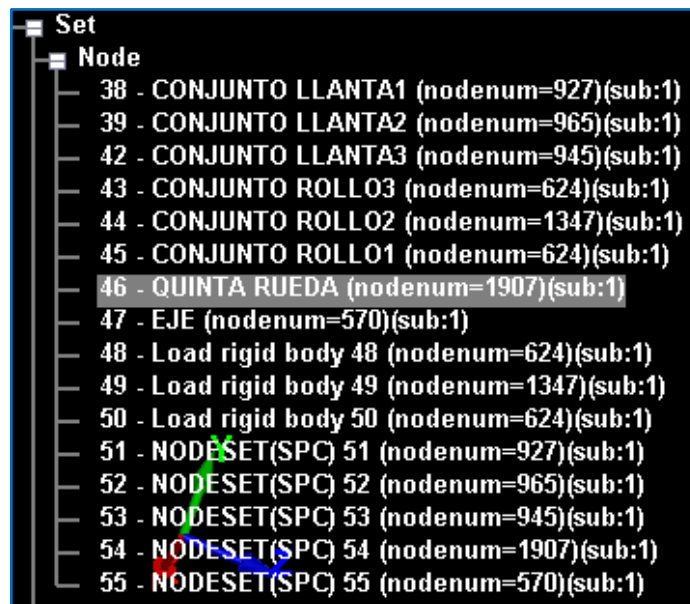


Figura 3.21. Lista de sets.

A continuación, se muestra los sets terminados figura 3.22 y figura 3.23.

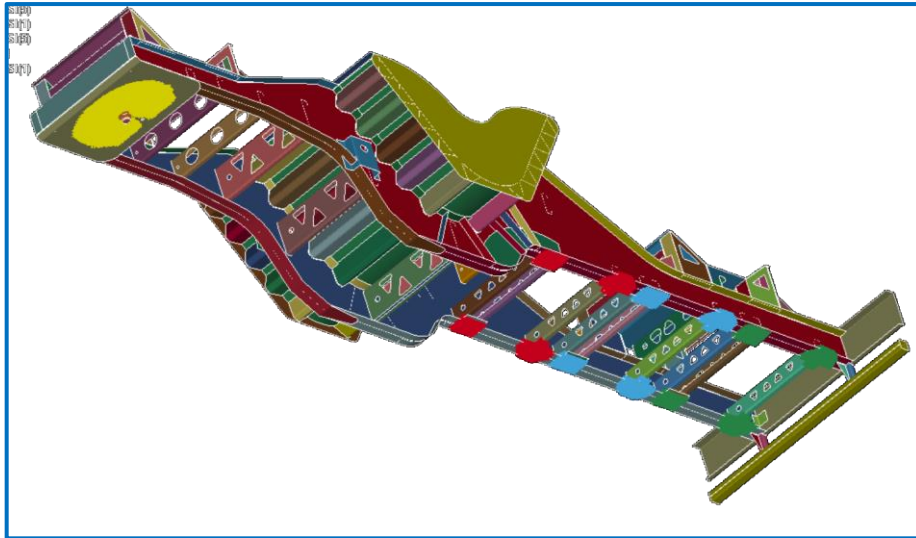


Figura 3.22. Aplicación de condiciones de frontera.

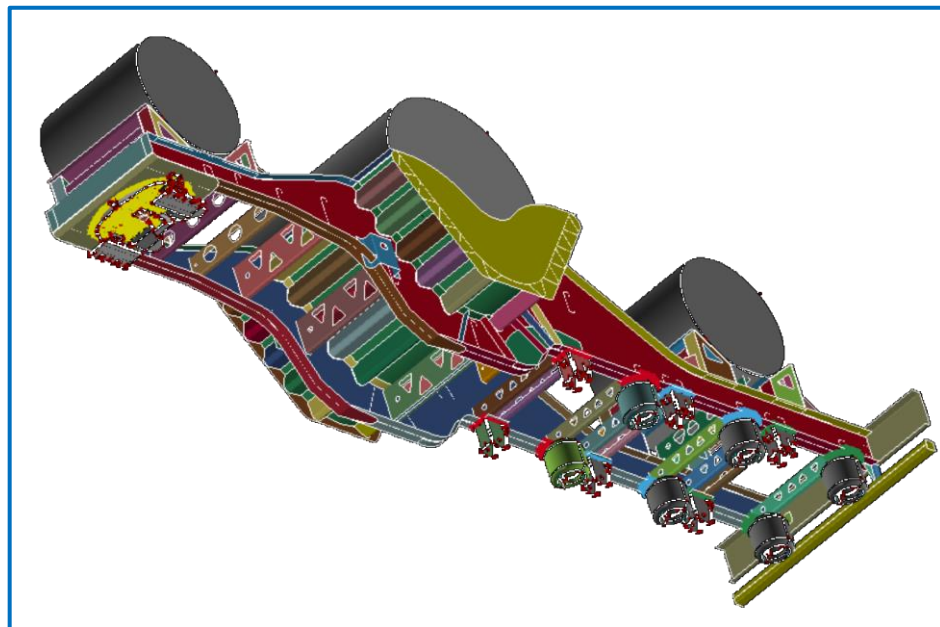


Figura 3.23. Superficies de contacto terminado.

3.5 APLICACIÓN DE CARGA.

Para la aplicación de condiciones de frontera se toman en cuenta los rollos y los nodos donde harán contacto, se declaran los nodos donde se aplicará la carga.

Casos de estudio.

Se muestran los siguientes casos que influirán en la carga aplicada en la silleta, los siguientes casos de estudio fueron dados por el proceso que lleva la empresa en el traslado de los rollos, mostrado en las figuras 3.24, 3.25, 3.26.

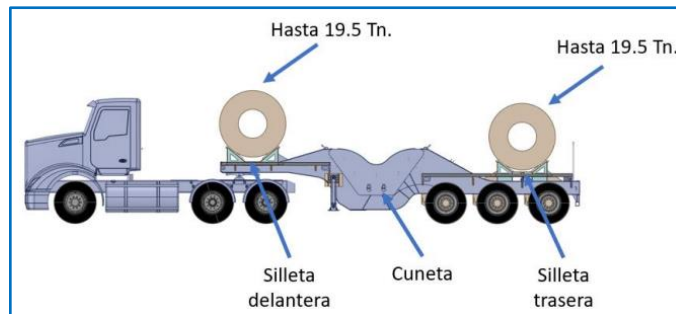


Figura 3.24. Caso "A".

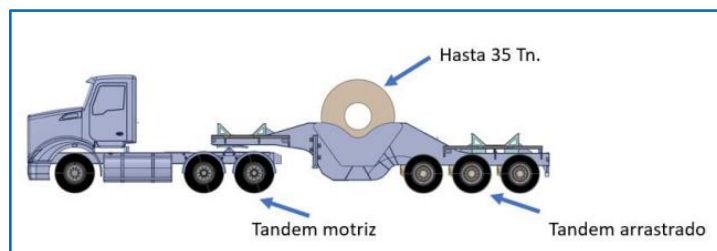


Figura 3.25. Caso "B".

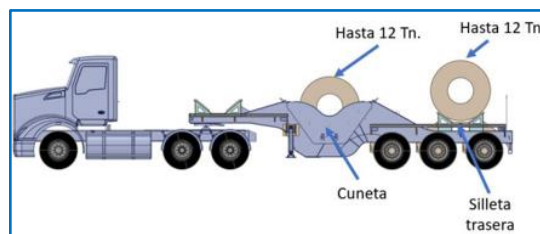


Figura 3.26. Caso "C".

Para la primera parte se simulan los rollos, los rollos no forman parte del análisis solo sirven de referencia, mostrado en la figura 3.27.

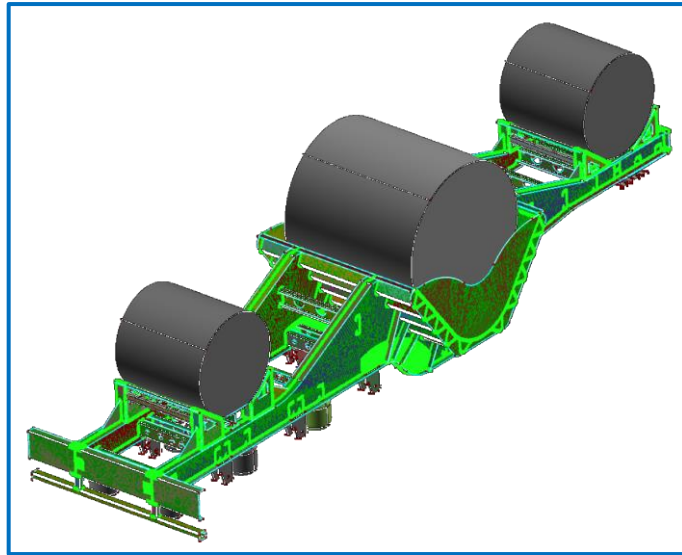


Figura 3.27. Simulación de rollos.

Para la aplicación las cargas se seleccionan de forma manual cada nodo, el área seleccionada coincide con el área de contacto del nodo, figura 3.28 y figura 3.29.

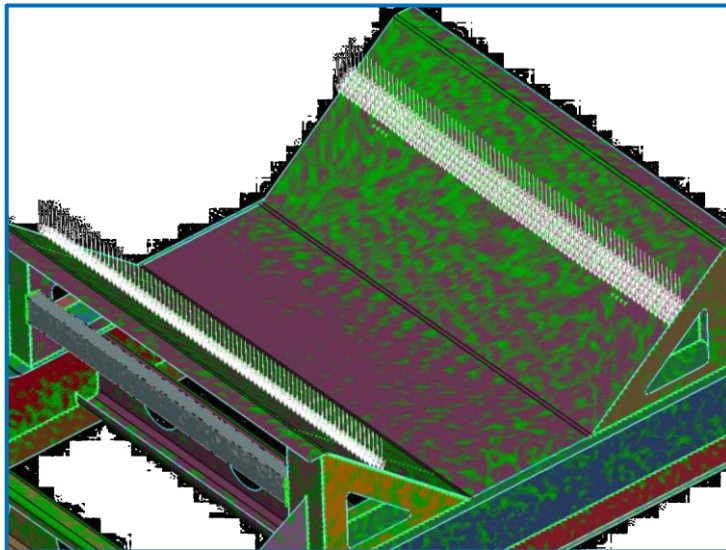


Figura 3.28. Selección de nodos.

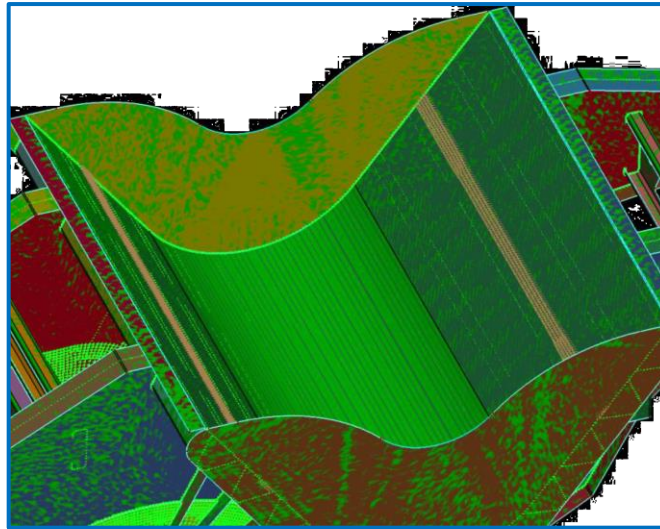


Figura 3.29. Selección de nodos.

Para la aplicación las cargas se calculan haciendo la división del peso entre el número de nodos según el rollo que corresponda, como se muestra en la figura 3.30 a continuación.

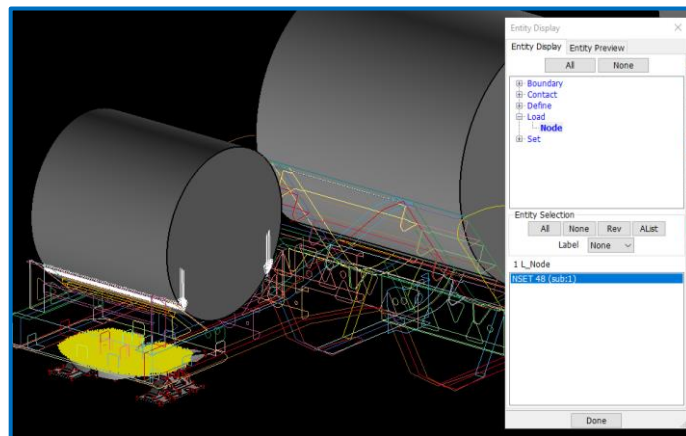


Figura 3.30. Aplicación de carga.

3.5 APLICACIÓN DE CONTROLES.

Para la aplicación de controles se aplican los requeridos para el correcto funcionamiento del análisis, los controles son los siguientes:

Control para estudio estático: CONTROL IMPLICIT GENERAL.

Control para duración del estudio: CONTROL_TERMINATION.
Controles/solicitud de salida: DATABASE_BINARY_D3PLOT.

Se muestra en la siguiente figura 3.31, los controles utilizados.

The figure shows three overlapping 'Keyword Input Form' windows. The top window is for '*CONTROL_IMPLICIT_GENERAL (1)' with fields: IMFLAG (1), DTD (0.1000000), IMFORM (2), NSBS (1), JGS (2), CNSTN (0), FORM (0), and ZERO V (0). The middle window is for '*CONTROL_TERMINATION (1)' with fields: ENDTIM (0.0000000), ENDCYC (0), DTMIN (0.0), ENDENG (0.0), ENDMAS (1.000e+00), and NOSOL (0). The bottom window is for '*DATABASE_BINARY_D3PLOT (1)' with fields: DT (0.1000000), LCDDT (), BEAM (), NPLTC (), PSETID (), and active optional cards (None selected). It also has fields for JOOPT (0), RATE (), CUTOFF (), WINDOW (), TYPE (0), and PSET ().

Figura 3.31. Controles utilizados.

A continuación, en la figura 3.32 se muestra un resumen general de los comandos utilizados.

The 'Keyword Manager' window displays a list of keywords and their counts. The 'Edit' field is set to 'Keyword Search'. The 'Model' radio button is selected. The table below shows the keywords and their counts:

Name	Count
CONTACT	1
AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_TIED	1
CONTROL	2
IMPLICIT_GENERAL	1
TERMINATION	1
DATABASE	1
BINARY_D3PLOT	1
ELEMENT	787856
SHELL	209787
SOLID	578069
KEYWORD	1
MAT	1
001-ELASTIC	1
NODE	346376
PART	155
SECTION	3
SHELL	2
SOLID	1
SET	1
TITLE	1

Below the table, there are options for 'Material arrange' (GroupBy: Model, Sort: Type, List: All) and buttons for 'Model Check', 'Keyword Del', 'ResForm', 'ExpandAll', 'CollapseAll', and 'Done'.

Figura 3.32. Resumen general de comandos utilizados.

En conclusión, se han detallado exhaustivamente los pasos llevados a cabo para realizar la estimación del ciclo de vida de la plataforma Big Coil. La metodología empleada incluyó varias etapas críticas, comenzando con la depuración y preparación del modelo geométrico en SolidWorks, seguida de la definición y corrección de la geometría en LS-Dyna. Posteriormente, se aplicaron técnicas específicas de mallado y se establecieron las condiciones fronteras y cargas dependiendo del caso necesarias para el análisis.

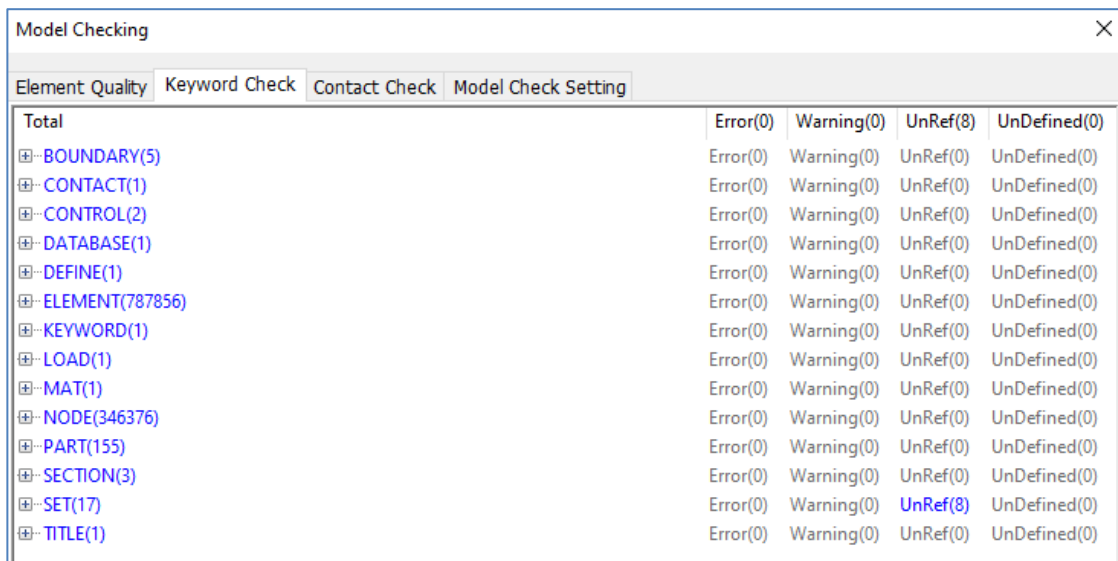
Capítulo 4

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis y la metodología aplicada en el estudio.

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS.

Al realizar la revisión general de este estudio en LS-DYNA no marca ningún error como se muestra en la siguiente figura 4.1.



Model Checking				
Element Quality	Keyword Check	Contact Check	Model Check Setting	
Total	Error(0)	Warning(0)	UnRef(8)	UnDefined(0)
BOUNDARY(5)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
CONTACT(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
CONTROL(2)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
DATABASE(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
DEFINE(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
ELEMENT(787856)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
KEYWORD(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
LOAD(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
MAT(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
NODE(346376)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
PART(155)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
SECTION(3)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)
SET(17)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(8)	UnDefined(0)
TITLE(1)	Error(0)	Warning(0)	UnRef(0)	UnDefined(0)

Figura 4.1. Revisión general.

Después se procede a correr el programa y marca error, mostrado en la figura 4.2.

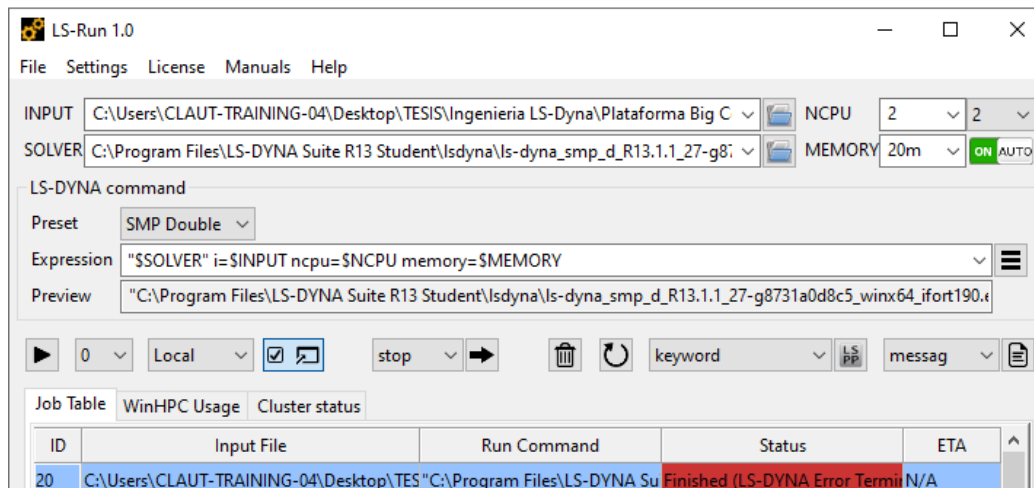


Figura 4.2. Error de resultado mostrado.

```

*** Beginning to read structured input file ***

*** Error 20001 (STR+1)
      input error found in structured input
      reading 1st control card
      line number 2 contains improperly formatted data
***** line# 2
This problem may be solved by using long=s option.
      E+      E.+0      0'i

Error termination                                06/06/24 08:49:36

Memory required to complete solution      :      0
Additional dynamically allocated memory:   1976K
Total:                                    1976K

Timing information
      CPU(seconds)  %CPU  Clock(seconds) %Clock
-----
Totals              1.0000E+00  100.00    1.0000E+00  100.00
Problem time       =  0.0000E+00

```

Figura 4.3. Error mostrado.

Se produce el error 20001 (STR+1), el cual describe un error en la definición de las propiedades, mostrado en la figura 4.3.

Este error indica que existe una carencia en la tarjeta de material, específicamente en elementos como la identificación (ID) o aspectos relacionados con el formato de la declaración de las secciones.

Este problema surge debido a la gran cantidad de componentes involucrados. La complejidad asociada con el manejo y la gestión de múltiples elementos puede dar lugar a errores en la configuración y asignación de parámetros, tales como la falta de información en la tarjeta de material o problemas con el formato de las declaraciones de las secciones.

También se origina debido a la presencia de dos tipos distintos de elementos en el modelo. La coexistencia de elementos tipo "shell" y elementos tetraédricos puede complicar la configuración y la integración adecuada entre ellos, especialmente si las tarjetas de material y las declaraciones de las secciones no están correctamente alineadas. La diferencia en las características y los requerimientos de cada tipo de elemento puede llevar a errores si no se gestionan adecuadamente.

A pesar de los esfuerzos significativos realizados para alcanzar los objetivos establecidos, los resultados finales no cumplieron con las expectativas. Esto se debe a los problemas previamente mencionados, para los cuales no se logró encontrar una solución efectiva dentro del plazo disponible.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las conclusiones de la investigación, Asimismo, se destacan las implicaciones de estos resultados para la práctica y se proponen recomendaciones para futuras investigaciones.

Se logró obtener una visión integral del proceso de análisis estructural con un enfoque específico en la dinámica de vibraciones dentro de una estructura. Este análisis detallado permitió una comprensión exhaustiva de los métodos y técnicas aplicables para evaluar y optimizar el comportamiento vibratorio de la estructura en cuestión.

Se realizó una revisión exhaustiva del estado del arte sobre cada uno de los procesos necesarios para llevar a cabo un análisis estructural completo. Este estudio permitió consolidar y fortalecer el conocimiento sobre los diversos aspectos y técnicas involucradas en el análisis, proporcionando una base sólida para la implementación efectiva de los métodos requeridos.

5.1 RECOMENDACIONES.

Debido a las limitaciones temporales establecidas para la elaboración de esta tesis, no fue posible continuar la búsqueda de una solución alternativa al problema identificado. En consecuencia, se sugiere abordar el análisis desde un enfoque diferente para su resolución. En el presente estudio, se emplearon dos tipos de elementos distintos: elementos tipo "shell" y elementos sólidos

“tetraédricos”, los cuales fueron interconectados mediante la aplicación de contactos.

En base a los errores identificados en el proceso actual de asignación de elementos, se recomienda revisar y ajustar el enfoque utilizado para garantizar una asignación más eficiente. Este proceso es crucial para asegurar la integridad y la exactitud de los análisis realizados.

1. La evaluación con un único elemento permite una representación más directa y controlada de las variables estudiadas, eliminando la complejidad añadida de múltiples elementos y reduciendo las posibles fuentes de error. Al centrarse en un solo elemento, se obtiene una mayor claridad en la identificación de comportamientos y efectos específicos, lo que puede mejorar la precisión de los resultados y simplificar el proceso de validación.
2. Investigar y determinar la configuración o los controles necesarios para garantizar el funcionamiento adecuado del contacto utilizado, denominado Automatic Surface to Surface Contact, es esencial para lograr una integración correcta entre los elementos tipo "shell" y los elementos tetraédricos. Este análisis debe enfocarse en ajustar los parámetros de contacto y las condiciones de configuración para asegurar una unión efectiva y precisa entre los diferentes tipos de elementos en el modelo.
3. Investigar y evaluar controles adicionales relacionados con la integración de estos elementos es crucial. Esto incluye la identificación y aplicación de configuraciones alternativas o técnicas avanzadas que puedan mejorar la unión entre los elementos tipo "shell" y los elementos tetraédricos, asegurando así una interacción adecuada y precisa dentro del modelo.

Referencias

- [1] NOM-012-SCT-2-2017. "Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal".
- [2] Abad, J., & Cuartero, J. (2017). Prediction by means of numerical simulation of fatigue life in mechanical components subject to random vibrations: methodology-parameters to consider. 21th International Congress on Project Management And Engineering.
- [3] Fouchez, B. (2013). Probabilistic Random Vibration Fatigue.
- [4] Bisping, J. (2015). Fatigue life approach for large components in heavy plant engineering based on rainflow counted local strains.
- [5] Bennebach, M., Rognon, H., & Bardou, O. (2013). Fatigue of Structures in Mechanical Vibratory Environment. From Mission Profiling to Fatigue Life Prediction. *Procedia Engineering*, 66, 508-521.
- [6] Hack, M., & Zingsheim, F. (2013). Multiaxial Load Situations in Random Vibration Fatigue – Phasing and Cross Correlation. *Procedia Engineering*, 66, 530–538.
- [7] Bibbo, N. D., Larsen, M. L., Baumgartner, J., & Arora, V. (2022). An improved rainflow counting method for multiaxial stress states using the minimum circumscribed circle method to identify shear stress ranges. *International Journal of Fatigue*, 163, 106997.
- [8] Nishihara, T., & Yamada, T. (1948). The Fatigue Strength of Metallic Materials under Alternating Stresses of Varying Amplitude. *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu/Nihon Kikai Gakkai Ronbunshū*, 14(47-1), 5-18.
- [9] Krairi, A., & Doghri, I. (2013). Multi-scale Damage Model for Mechanical High Cycle Fatigue (HCF) of Short Glass Fibre Reinforced Thermoplastics (SGFRTP). *Procedia Engineering*, 66, 759-765.
- [10] Kühn, B. (2013). Assessment of existing steel structures - Recommendations for.

-
- [11] Gaborit, P., Gilblas, N., Pyre, A., & Desmorat, R. (2013). Damage: Experimental Validation and Prospects. *Procedia Engineering*, 66, 684-688.
- [12] Subramanian, V. (2022). Approaches to implement safe by design in early product design through combining risk assessment and Life Cycle Assessment.
- [13] Klein, P. (2013). FEA Structural Stress of Modalohr system for semi-trailer rail transportation: weld root fatigue focus.
- [14] Gautrelet, C., Khalij, L., Appert, A., & Serra, R. (2019). Linearity investigation from a vibratory fatigue bench. *Mechanics & Industry*, 20(1), 101.
- [15] Stanzl-Tschegg, S. (2014). Very high cycle fatigue measuring techniques. *International Journal of Fatigue*, 60, 2-17.
- [16] Vasudevan, A., Sadananda, K., & Glinka, G. (2001). Critical parameters for fatigue damage. *International Journal of Fatigue*, 23, 39-53.
- [17] Newman, J. C. (1992). Advances in fatigue life prediction methodology for metallic materials. *STIN*, 92, 34191.
- [18] Newman, J. C., Wu, X. R., Venneri, S. L., & Li, C. G. (1994). Small-crack effects in high-strength aluminum alloys. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 94, 34299.
- [19] Newman, J. C., Phillips, E. P., & Everett, R. A. (1994). Fatigue life and crack growth prediction methodology. *NASA TECHNICAL MEMORANDUM 109044*.
- [20] Newman, J. (1998). The merging of fatigue and fracture mechanics concepts: a historical perspective. *Progress In Aerospace Sciences/Progress In Aerospace Sciences*, 34(5-6), 347-390.
- [21] Celorrio Barragué, L. (s. f.). Metodología eficiente de optimización estructural basada en fiabilidad. *12th International Conference on Project Engineering*.
- [22] Svensson, T., & Johannesson, P. (2013). Reliable Fatigue Design, by Rigid Rules, by Magic or by Enlightened Engineering. *Procedia Engineering*, 66, 12-25.
- [23] S, A., K, S., & K, N. (2012). Vibration Analysis of Cracked Beams Using the Finite Element Method. En *InTech eBooks*.
- [24] Simón, G. E., Guadalupe, V., Dariusz, S., Jorge, B., & Claudia, C. (2013). Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-

axisimétrica: estudio complementario. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 207-222.

[25] García, L. V. (2017). Comparación entre la estimación de parámetros modales de estructuras a partir de análisis modal clásico y operacional con modificaciones de masa. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 33(3-4), 188-196.

[26] Ibrahim, S. R., Asmussen, J. C., & Brincker, R. (1996). Modal Parameter Identification from Responses of General Unknown Random Inputs. *Proceedings Of The 14th International Modal Analysis Conference*, 446-452.

[27] Nađ, M. (2007). Structural dynamic modification of vibrating systems. *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*.

[28] Foti, D. (2013). Dynamic Identification Techniques to Numerically Detect the Structural Damage. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7(1), 43-50.

[29] Sestieri, A. (2000). Structural dynamic modification. *Sadhana*, 25(3), 247-259.

[30] Mordini, A., Savov, K., & Wenzel, H. (2007). The Finite Element Model Updating: A Powerful Tool for Structural Health Monitoring. *Structural Engineering International*, 17(4), 352-358.

[31] Morassi, A., & Vestroni, F. (s. f.). *Dynamic methods for damage detection in structures*. Springer Wien New York.

[32] Amiri, H. R., Esfandiari, M. J., Manshadi, S. H. D., & Urgessa, G. (2020). A novel sensitivity-based method for damage detection of a structural element. *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(6), 1079-1093.

[33] Peng, X.; Yang, Q.; Qin, F.; Sun, B. Structural Damage Detection Based on Static and Dynamic Flexibility: A Review and Comparative Study. *Coatings* 2024, 14, 31.

[34] Hong-Ping, Z., Bo, H., & Xiao-Qiang, C. (2005). Detection of structural damage through changes in frequency. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 10(6), 1069-1073.

-
- [35] Cawley, P., & Adams, R. D. (1979). The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 14(2), 49-57.
- [36] Adams, R., & Cawley, P. (1978). Vibration testing as a nondestructive test tool for composite materials (pp. 159-175).
- [37] Adams, R. D., Cawley, P., Pye, C. J., & Stone, B. J. (1978). A Vibration Technique for Non-Destructively Assessing the Integrity of Structures. *Journal Of Mechanical Engineering Science*, 20(2), 93-100.
- [38] Ren, W., & De Roeck, G. (2002). Structural Damage Identification using Modal Data. I: Simulation Verification. *Journal Of Structural Engineering*, 128(1), 87-95.
- [39] Riveros, C. A., García, E. F., & Builes, M. A. (2010). A numerical approach for fault detection in beam-like structures using modal strain energy. *Revista EIA*, 7(13), 171-184.
- [40] Boutet, P., Hild, F., & Lefebvre, F. (2013). Probabilistic Prediction of Fatigue Life of Cracked Parts: Linear Elastic Fracture Mechanics based Approach. *Procedia Engineering*, 66, 343-353.
- [41] Duvnjak, I., & Rak, M. (2014). Damage detection of platelike structures based on changes of basic modal parameters. *The 21 St International Congress on Sound and Vibration*, 4329.
- [42] White, G. (1990). *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima LDI.
- [43] Beards, C. F. (1995). *Engineering Vibration Analysis with Application to Control Systems*.
- [44] Beards, C. F. (1996). *Structural Vibration - Analysis and Damping*.
- [45] Budynas, R. G. (2012). *Diseño en ingeniería Mecánica de Shigley*.
- [46] Kelly, S. G. (2000). *Fundamentals of Mechanical Vibrations*.
- [47] Stephen Hanly. (2020). Key Factors to consider when configuring a Vibration Measurement System.
- [48] Steve Hanly. (2020). *Shock & Vibration Overview*. Engineering eBook.