



# INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Mecánica Automotriz**

**Autor:** Jean Pierre Moreno Carrión

**Tutor:** Ing. Edgar Vera Puebla

**Análisis de Falla Estructural en Cigüeñal del Motor Isuzu D-Max  
2.5L a Través de Elementos Finitos**



### **Certificación de Autoría**

Yo, Jean Pierre Moreno Carrión, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad intelectual, reglamento y leyes.

---

Jean Pierre Moreno Carrión

CI: 0706335841

### **Aprobación del Tutor**

Yo, Edgar Gustavo Vera Puebla certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su seguridad y autenticidad, como de su contenido

---

Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla

Director del Proyecto

## **Dedicatoria**

Agradecerle a Dios primeramente por haberme permitido terminar mi carrera universitaria, a mis padres quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, a mi hermano que lo quiero mucho y que sea un ejemplo a seguir para su vida profesional y sobre todo esto es por y para ustedes mi hermosa familia. Los amo.

***Jean Pierre Moreno Carrión***

## **Agradecimientos**

Terminar mi carrera universitaria es de gran valor, ya que el esfuerzo y sacrificio que uno hace al ser de otra provincia es grande.

Agradecerle primeramente a mi Dios que sin él no pude haber logrado culminar mi etapa universitaria, a mis padres quienes han demostrado que con amor, compromiso, actitud, pasión, paciencia y perseverancia uno puede lograr sus objetivos. Agradecerle a la Ing. Daniela Jerez quien fue una gran docente y una gran persona cuando asumió su cargo nunca dio la espalda a sus estudiantes quienes de una u otra manera queríamos dejar el nombre de la institución en lo más alto, en especial a mi quien me apoyo en todas mis competencias de karting donde obtuve un campeonato provincial del guayas en el año 2018 y la primera copa interuniversitaria para la Universidad Internacional Del Ecuador extensión Guayaquil en la ciudad de Riobamba, al Ing. Edgar Vera quien además de docente y tutor se convirtió en un guía, en un amigo quien veía lo mejor para sus estudiantes y acompañaba a la pasión fierrera y era quien ayudaba a gestionar los viajes y salidas del club hacia una competencia de autos, al Ing. Oscar Villavicencio que de igual manera se convirtió en un gran amigo en el transcurso de mi carrera universitaria, a mi gran Sensey y el mejor preparador de autos de competencia que puede tener el país el Ing. Hoover Ochoa quien me abrió sus puertas en su prestigioso taller donde aprendí muchas cosas y como realmente tenía que desenvolverse un profesional en la práctica, a mi grupo de compañeros quienes estuvimos siempre unidos. Y en especial a toda mi familia que sin ellos nada de esto pude haber logrado a ellos es quien les debo mucho y sé que con esfuerzo vamos a seguir sumando momentos inolvidables como estos.

¡¡A TODOS USTEDES GRACIAS TOTALES!!

*Jean Pierre Moreno Carrión*

## Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Ecuaciones.....	xiv
Índice de Tablas.....	xv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Capítulo I.....	1
Problema De La Investigación.....	1
1.1. Tema de Investigación.....	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	1
1.3. Formulación del Problema.....	2
1.4. Sistematización del Problema.....	2
1.5. Objetivos de la Investigación.....	3
1.5.1. Objetivo General.....	3
1.5.2. Objetivos Específicos.....	3

1.6.	Justificación e Importancia de la Investigación .....	3
1.6.1.	Justificación Teórica.....	3
1.6.2.	Justificación Metodológica.....	5
1.6.3.	Justificación Práctica .....	6
1.6.4.	Delimitación Temporal.....	6
1.6.5.	Delimitación Geográfica.....	6
1.6.6.	Delimitación del Contenido.....	7
1.7.	Hipótesis.....	7
1.7.1.	Variables de Hipótesis .....	7
1.7.1.1.	Variables Independientes. ....	7
1.7.1.2.	Variables Dependientes.....	7
1.8.	Alcance.....	8
Capítulo II	.....	10
2.	Marco de Referencia .....	10
2.1.	Introducción .....	10
2.2.	Antecedentes de Análisis por Fatiga .....	10
2.3.	Fundamentos de la Fatiga.....	12
2.4.	Características de la Rotura de un Elemento por Fatiga .....	13
2.5.	Estudio de Fatiga.....	13
2.6.	Diagrama de Fatiga S-N.....	14



2.7.	Zonas en el Diagrama de Fatiga.....	16
2.8.	Factores de Varían el Límite de Resistencia a la Fatiga .....	18
2.8.1.	Factor de Superficie ( $k_a$ ).....	19
2.8.2.	Factor de Tamaño ( $k_b$ ) .....	20
2.8.3.	Factor de Carga ( $k_c$ ).....	20
2.8.4.	Factor de Temperatura ( $k_d$ ).....	20
2.8.5.	Factor de Confiabilidad ( $k_e$ ) .....	21
2.9.	Esfuerzos Fluctuantes.....	21
2.10.	Criterio de la Falla por Fatiga Ante Esfuerzos Variables.....	22
2.10.1.	Criterio de Goodman Modificado.....	22
2.10.2.	Criterio de Soderberg.....	23
2.10.3.	Criterio de Gerber .....	24
2.11.	Factor de Seguridad por Carga Estática .....	25
2.12.	Factor de Seguridad por Carga Dinámica.....	26
2.13.	Absorbedores de Vibración .....	26
2.14.	Tipos de Elementos Estructurales.....	27
2.15.	Tipos de Estructuras .....	28
2.16.	Cigüeñal.....	28
2.17.	Software.....	30
2.18.	Análisis Estructural sobre Cigüeñal con Cargas Estáticas .....	31

2.19.	Método de Elementos Finitos .....	32
2.19.1.	Cálculo de Esfuerzos y la Deformación.....	33
2.19.2.	Geometría del Elemento de Mallado .....	35
2.19.3.	Orden del Elemento Finito.....	36
2.19.4.	Comparación entre Elementos H y P .....	37
2.19.5.	Mallado .....	37
2.19.6.	Consideraciones de Frontera.....	38
2.19.7.	Cargas Aplicadas .....	39
Capítulo III.....		40
3.	Método de Modelado .....	40
3.1.	Herramientas para el Modelado y Análisis .....	40
3.2.	Selección de Software para Análisis .....	42
3.3.	Alimentación de Datos en Autodesk - Inventor .....	50
3.4.	Mallado de Cigüeñal .....	51
3.5.	Condiciones de Frontera.....	52
3.6.	Análisis Estructural .....	55
3.6.1.	Cargas Estáticas .....	55
3.6.2.	Carga Dinámica .....	57
3.7.	Obtención de Resultados.....	58
Capítulo IV .....		60

4.	Análisis de Resultados .....	60
4.1.	Análisis Transitorio .....	60
4.2.	Análisis de Carga Estática.....	61
4.3.	Análisis de Resultados Obtenidos .....	63
	Conclusiones.....	65
	Recomendaciones .....	66
	Bibliografía.....	67
	Anexos .....	69
	Anexo 1: Informe de Obtención de Resultados de Análisis Estructural de Cigüeñal a través de Software Inventor .....	69

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Cargas Puntuales Sobre Elemento Estructural</i> .....	14
Figura 2 <i>Generación de Diagrama de Fatiga S-N</i> .....	16
Figura 3 <i>Zonas de Diagrama de Fatiga</i> .....	18
Figura 4 <i>Gráfica Representando Línea de Goodman</i> .....	23
Figura 5 <i>Gráfica Representando Línea de Soderberg</i> .....	24
Figura 6 <i>Gráfica Representando Ciclo de Gerber</i> .....	25
Figura 7 <i>Partes Principales del Cigüeñal</i> .....	28
Figura 8 <i>Ícono Software Inventor</i> .....	30
Figura 9 <i>Cargas Estáticas que Soporta un Cigüeñal</i> .....	31
Figura 10 <i>Aplicación de FEA Sobre Cigüeñal</i> .....	33
Figura 11 <i>Mallado y Descripción de Nodos y Elementos</i> .....	34
Figura 12 <i>Grado de Libertad Globales en Nodos</i> .....	36
Figura 13 <i>Mallado de Elemento Sólido</i> .....	38
Figura 14 <i>Cigüeñal de Estudio de Caso de Fractura</i> .....	40
Figura 15 <i>Cigüeñal Fraccionado por Falla Estructural</i> .....	41
Figura 16 <i>Reconstrucción Tentativa de Cigüeñal Fraccionad</i> .....	41
Figura 17 <i>Toma de Datos Medibles del Cigüeñal</i> .....	42
Figura 18 <i>Ejemplo de Uso de Software Inventor</i> .....	43
Figura 19 <i>Modelado de Cigüeñal en Inventor</i> .....	44
Figura 20 <i>Selección de Plano para Inicio de Proyecto</i> .....	45
Figura 21 <i>Diseño de Contrapesos Exterior de Cigüeñal</i> .....	45
Figura 22 <i>Diseño de Muñón de Bancada de Cigüeñal</i> .....	46

Figura 23 <i>Diseño de Base de Acoplamiento para Volante de Inercia.</i> .....	46
Figura 24 <i>Diseño de Muñón de Biela de Cigüeñal.</i> .....	47
Figura 25 <i>Diseño de Contrapeso Interior de Cigüeñal.</i> .....	47
Figura 26 <i>Diseño de Eje de Cigüeñal.</i> .....	48
Figura 27 <i>Diseño de Orificios de Lubricación de Cigüeñal.</i> .....	49
Figura 28 <i>Sección de Visualización de Modelado del Cigüeñal.</i> .....	49
Figura 29 <i>Propiedades de Material Acero Forjado en Software Inventor.</i> .....	50
Figura 30 <i>Generación de Mallado en Software Inventor.</i> .....	52
Figura 31 <i>Generación de Condiciones de Frontera en Software Inventor.</i> .....	53
Figura 32 <i>Aplicación de Condiciones de Frontera en Software Inventor.</i> .....	54
Figura 33 <i>Aplicación de Restricciones Fijas.</i> .....	54
Figura 34 <i>Inicio de Simulación de Cargas.</i> .....	55
Figura 35 <i>Aplicación de Cargas.</i> .....	56
Figura 36 <i>Aplicación de Cargas Dinámicas.</i> .....	57
Figura 37 <i>Ejecución de Simulación del Análisis.</i> .....	58
Figura 38 <i>Resultado de Simulación.</i> .....	58
Figura 39 <i>Resultado de Puntos Críticos y Gráfico de Convergencia.</i> .....	59
Figura 40 <i>Resultado de Tensión de Von Mises.</i> .....	62
Figura 41 <i>Resultado de Coeficiente de Seguridad.</i> .....	63

**Índice de Ecuaciones**

<b>Ecuación 1</b> Modelo Matemático para Factor de Superficie $k_a$ .....	20
<b>Ecuación 2</b> Modelo Matemático para Factor de Confiabilidad $k_e$ .....	21

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Coeficientes y Exponentes en Función del Acabado Superficial .....	19
<b>Tabla 2</b> Resultados Principales Obtenidos por Simulación .....	61

## Resumen

El presente trabajo investigativo está basado en un caso de estudio sobre un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L que presenta una falla por rotura, a lo que por medio de procesos de dibujo asistido por ordenador e ingeniería asistida por ordenador se realiza el modelado y generación de un análisis de tensión para de esta manera poder observar de forma gráfica y colorimétrica su comportamiento, así como de manera cuantitativa generar los valores máximos y mínimos de su comportamiento estructural.

El software que se utiliza para este proyecto es Inventor de Autodesk, el cual cumple con las características adecuadas que permiten realizar varios tipos de análisis y así poder determinar las posibles causas por las que se provocó la falla de rotura.

Para este tipo de análisis y obtención de los resultados esperados se trabaja a través de un proceso numérico de elementos finitos el mismo que permite determinar parámetros fundamentales como lo es el análisis de tensión de Von Mises (Min: 0.00000185 MPa, Max: 3.27 MPa), tensiones principales (Min: -0.651 MPa, Max: 4.09 MPa) y secundarias, deformaciones del elemento en todas sus dimensiones (Max: 0.000134 mm) y coeficiente o factor de seguridad (15 su).

Bajo todo lo establecido en los párrafos anteriores se logra determinar el respectivo análisis para de esta manera llegar a la conclusión más aproximada del por qué se generó la falla de rotura en el cigüeñal del motor por parte de este tipo de proceso.

**Palabras clave:** Falla estructural, cigüeñal, automotriz, elementos finitos.



## Abstract

The present investigative work is based on the analysis of an Isuzu D-Max 2.5 L crankshaft, it presents a failure due to breakage. Through computer-aided drawing and engineering processes a modeling and generation of stress analysis is carried out in order to observe its behavior graphically and colorimetrically as well as quantitatively generate the maximum and minimum values of its structural behavior.

The software used for this project is Autodesk Inventor, which complies with the appropriate characteristics that allow various types of analysis to be carried out and thus be able to determine the possible causes for which the failure was caused.

This type of analysis permit to get the expected results, the work was made through a numerical process of finite elements, which allows to determine fundamental parameters such as the Von Mises stress analysis (Min: 0.00000185 MPa, Max: 3.27 MPa), main and secondary stresses (Min: -0.651 MPa, Max: 4.09 MPa), element deformations in all its dimensions (Max: 0.000134 mm) and coefficient or safety factor (15 su).

Under everything established in the previous paragraphs, it is possible to determine the respective analysis in order to reach the approximate conclusion of why the failure of the engine crankshaft was generated by this type of process.

**Keywords:** Structural failure, crankshaft, automotive, finite elements.

## Capítulo I

### Problema De La Investigación

#### 1.1. Tema de Investigación

Análisis de falla estructural en cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L a través de elementos finitos.

#### 1.2. Planteamiento del Problema.

Al momento de tratar un caso de análisis estructural de un elemento mecánico este se encuentra involucrado con el uso de ecuaciones de resistencia de materiales que permiten hallar los esfuerzos internos, tensiones y deformaciones que se encuentran implicadas sobre una estructura resistente y en el campo de los vehículos está la carrocería como los elementos que compone cada uno de los sistemas que lo conforman.

En el campo del funcionamiento de elementos automotrices se presentan un sinnúmero de fallas estructurales los mismos que dependerán de algunas causas, las mismas que hasta en la actualidad se enfocan en el desarrollo del análisis de fatiga y puntualmente para el presente proyecto investigativo lo es sobre el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L, tomando como referencia algunos estudios como lo son artículos científicos que presentan un enfoque relacionado con la orientación de determinar concretamente las características químicas del material o materiales con las que han sido manufacturados estos cigüeñales de los cuales también han sido aplicado estudios de manera microestructural en ensayos de tensión hasta llegar al punto de zona plástica, que es el procedimiento más común y cómodo que se ha realizado como parte de un análisis y así poder lograr un análisis en los que se permite medir la dureza del material con la que está elaborado un área puntual del cigüeñal, permitiendo de esta manera generar o ampliar el estudio en parte diferencial de todo el cuerpo del cigüeñal.

Cabe recalcar que mucho de los estudios investigativos o artículos relacionados con este tipo de investigación no descarta que lo realizado sean una causa esencial para poder determinar

la falla exacta del componente así como la determinación de su vida útil, por lo que basándose en este criterio se abre la oportunidad de poder originar a través del presente estudio investigativo un análisis de fatiga de manera visual por medio de simulación computacional en la que se presenta el comportamiento del elemento en estudio como lo es el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L, a través de la aplicación correcta de condiciones de frontera las mismas que tratan de llegar a ser las mismas que se aplican en el funcionamiento real del cigüeñal y apegándose de esta manera a la realidad por medio de un estudio tridimensional del componente.

### **1.3. Formulación del Problema**

¿Cómo influye la realización de un análisis estructural con aplicación de un software de ingeniería asistida, a través de elementos finitos y simulación tridimensional en visualizar el comportamiento estructural de un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 25 L, el mismo que es condicionado por sus respectivas condiciones de funcionamiento?

### **1.4. Sistematización del Problema**

- a. ¿Cuáles son los principales factores que influyen en el análisis estructural de un cigüeñal de motor de combustión interna?
- b. ¿Cómo se comporta visualmente un cigüeñal por medio de simulación tridimensional, para permitir un análisis estructural?
- c. ¿Qué condiciones de frontera se requieren para lograr un análisis estructural de un cigüeñal por medio de elementos finitos?
- d. ¿Qué software brinda las condiciones óptimas para la realización de un análisis estructural a través de elementos finitos?
- e. ¿Cuáles son los principales factores que influyen en el análisis estructural de un cigüeñal de acuerdo con su diseño?

- f. ¿Cómo determinar los puntos críticos estructurales en el comportamiento de un cigüeñal dentro del funcionamiento del motor?

## **1.5. Objetivos de la Investigación**

### **1.5.1. *Objetivo General***

Analizar el comportamiento estructural en un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L por medio de elementos finitos a través del software Inventor con aplicación de cargas a las que se encuentra sometido.

### **1.5.2. *Objetivos Específicos***

- Establecer los parámetros correspondientes para los cálculos analíticos que influyen en el desempeño del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L.
- Determinar el proceso correspondiente e idóneo con que se trabaja en el software Inventor para la realización del análisis estructural del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L.
- Validar los datos obtenidos que influyen en el análisis estructural según las cargas a la que se encuentra sometido en funcionamiento el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L.

## **1.6. Justificación e Importancia de la Investigación**

El presente trabajo investigativo se fundamenta según la definición de los objetivos planteados los mismos que generan las interrogantes precisas para poder determinar el proceso que se llevará para alcanzarlos hasta su culminación y dentro de estos se tienen los siguientes:

### **1.6.1. *Justificación Teórica***

Dentro del funcionamiento de un motor de combustión interna, es muy común que se presenten paulatinamente fallas estructurales de sus componentes, los mismos que dependerán de algunos factores dependiendo del sistema o mecanismo al que pertenezcan, así como de cada uno de los esfuerzos directos o indirectos a los que están sometidos.

Por este motivo cada vez los evaluadores de fallas en elementos se cuestionan cuáles pueden llegar a ser las causas que producen dichas fallas que son innumerables y entre estas suelen estar relacionadas con los materiales por el motivo que un elemento suele fallar con mayor facilidad por una baja acción de esfuerzos variables, que por acción de esfuerzos constantes, teniendo en cuenta que si un elemento que está operando con esfuerzos repetidos así como esfuerzos estáticos es poco probable que sufra fallas como lo son roturas a menos que se produzcan por fatiga del material.

Por lo expuesto es que desde hace mucho tiempo se ha trabajado constantemente en el estudio del comportamiento sistemático sobre el fenómeno de fatiga de cada uno de los elementos que conforman estos mecanismos o sistemas en conjunto, lo que llevó a generar muchos conceptos sobre este tema como lo es por ejemplo: límite de fatiga, diagrama S-N que no es más que la generación de una curva que permite observar el comportamiento de un material en las que se define cada uno de los valores de tensión alternos en comparación a la cantidad del número de ciclos que se requieren para que se pueda provocar hasta causar la falla a través de un factor de tensión determinado, en definitiva no es más que la representación de la tensión alterna (S) versus el número de ciclos (N), también se tiene en cuenta el comportamiento de la proporcionalidad de las cargas estáticas, comportamientos de las deformaciones, comportamiento de los planos cristalinos del tipo de material, deformación del sector comprometido, comportamiento de las líneas de desplazamiento cuando son sometidas a esfuerzos máximos pero por debajo del límite de proporcionalidad, el aumento de número de líneas de deslizamiento producido por el aumento de esfuerzo y el aumento de su tamaño hasta el momento en que se genera la rotura de los cristales del material y por ende del elemento o elementos dependiendo del funcionamiento.

Resumiendo lo expuesto se llega a la determinación que existen varios estudios e investigaciones que se han realizado desde hace muchos años lo que permite basarse en estos

para la realización del presente estudio investigación pero aplicando nuevas formas de análisis e interpretación, pudiendo de esta manera ahorrar recursos y mejores resultados a través del uso de herramientas tecnológicas como lo son los softwares de ingeniería asistida por ordenadores y así lograr el objetivo planteado en el presente proyecto investigativo.

### **1.6.2. *Justificación Metodológica***

En cuanto al método que se aplica al presente proyecto investigativo es a través de un sinnúmero de modelos matemáticos denominados elementos finitos los mismos que son resueltos por un software denominado Inventor, que permitirá determinar el respectivo comportamiento estructural sobre el cigüeñal del motor de combustión interna que para el presente estudio lo es de un Isuzu D-Max 2.5L y los valores que estos sean generados se los compara con los que se desarrollan manualmente para de esta manera generar un correcto análisis comparativo.

Así mismo con la ayuda del modelado y simulación visual tridimensional permite analizar y determinar las áreas críticas en el comportamiento del elemento en cada uno de los nodos generados por el mallado del elemento dependiendo de la geometría del cigüeñal en estudio.

La facilidad de visualización tridimensional es una gran ventaja para poder determinar con mayor precisión el comportamiento y concluir cuál es el área o punto crítico donde se produce la rotura del elemento y así poder interpretar la falla para tomar la decisión correspondiente al fenómeno provocado, así como realizar una interpretación del funcionamiento del elemento con sus posibles causas del fallo.

Para resumir lo expuesto se puede determinar que por medio del presente estudio investigativo se lo llevará a cabo con la aplicación de los siguientes métodos: experimental, teórico y descriptivo, pero teniendo en cuenta que esto va a desarrollarse por etapas

dependiendo de la geometría de la forma del cigüeñal para poder sustentar el estudio científico para así demostrar su veracidad y fiabilidad.

### **1.6.3. *Justificación Práctica***

El presente estudio investigativo se justifica a través de un correcto uso del proceso y método que permite obtener las especificaciones técnicas del elemento, para posteriormente generar a través de un proceso de dibujo asistido por ordenador el modelado del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L como primera fase y luego continuar con la simulación por medio de un procedimiento de ingeniería asistida por ordenador, simular el comportamiento del elemento de acuerdo al material así como de cada una de las cargas que influyen de manera directa o indirecta sobre el cigüeñal, para posteriormente poder generar los criterios correctos de análisis y determinar cuál es el comportamiento estructural al que trabaja el elemento.

Este análisis de la falla del cigüeñal permitirá tener un criterio científico fundamentada para poder realizar mejoras en este tipo de elemento.

Así mismo el presente proyecto se lleva a cabo con la ayuda del programa Inventor de AutoDesk, que es un software que brinda las herramientas correctas para llevar a cabo la parte práctica de la investigación tanto para el modelado como para la simulación tridimensional.

### **1.6.4. *Delimitación Temporal***

El presente proyecto investigativo referente al análisis de falla en un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L por medio de elementos finitos, se encuentra determinado de forma cronológica por varias etapas como lo son investigativa y práctica, las mismas que se desarrollan desde el mes de marzo al mes de octubre de 2022, y de esta manera lograr alcanzar el objetivo planteado.

### **1.6.5. *Delimitación Geográfica***

El presente proyecto investigativo referente al análisis de falla en un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L por medio de elementos finitos, se lo lleva a cabo en Ecuador, provincia del

Guayas, cantón Guayaquil, con la dirección Av. Raúl Gómez Lince y calle 15, dentro de las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil.

#### **1.6.6. Delimitación del Contenido**

El desarrollo del presente proyecto investigativo se basa fundamentalmente en un aspecto de búsqueda de información minucioso teniendo de base fuentes bibliográficas, manuales técnicos, especificaciones técnicas, videografía, entrevistas con personal técnico expertos en el área y docentes del campo automotriz, todo esto permite que el estudio realizado alcance el objetivo propuesto con su respectiva limitación que lo es hasta alcanzar la simulación del elemento bajo las cargas a las que trabaja y determinando las causas por las que se produce su falla estructural.

Así mismo contempla el desarrollo del modelado y la simulación del componente por medio del software que para el presente estudio es Inventor siendo parte de la empresa AutoDesk.

### **1.7. Hipótesis**

¿La realización de un análisis de falla estructural de un cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L a través de elementos finitos permitirá determinar el comportamiento estructural por la que se generó la rotura del componente?

#### **1.7.1. Variables de Hipótesis**

##### **1.7.1.1. Variables Independientes.**

- Ingeniería asistida por ordenador.

##### **1.7.1.2. Variables Dependientes.**

- Cigüeñal.
- Esfuerzos estructurales
- Especificaciones técnicas.



## **1.8. Alcance**

Por medio del presente proyecto investigativo el cual lleva como tema: Análisis de falla estructural en cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L a través de elementos finitos, pretende realizar un estudio de caso el mismo que se presenta por parte de una falla estructural del elemento el cual lleva a tal punto que se presenta rotura en varias partes de su cuerpo, por lo que a través de un software se realiza un renderizado y simulación del elemento en estudio y posteriormente llegar a la simulación teniendo en cuenta cada uno de los valores de esfuerzos a las que el elemento se encuentra comprometido en condiciones de funcionamiento normal, pero al darse este inconveniente con la ayuda de este estudio lograr determinar cuál será una o varias causas por las que el cigüeñal alcanzó esta falla.

De manera detallada el presente proyecto de investigación se lo desarrolla por fases las mismas que se pretenden avanzar de la siguiente manera:

Primera fase, recopilación de toda la información necesaria para el estudio como lo es especificaciones técnicas del elemento en estudio, que para este caso es del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5L.

Segunda fase, esta contempla que, con la ayuda del software Inventor, se realiza el dibujo en dos y tres dimensiones del elemento en estudio para posteriormente con la ayuda de los valores reales de funcionamiento proceder a generar un estudio de simulación estructural para poder observar el comportamiento del elemento cuando este se encuentra en funcionamiento normal.

Tercera fase, luego de la generación de simulación se procede a la obtención de los valores del estudio los mismos que ingresan a ser analizados cada uno de estos, para de esta manera llegar a la cuarta fase que contempla en llegar a las conclusiones de el por qué se produjo el fallo estructural en dicho cigüeñal así como las respectivas recomendaciones que

permiten al lector tener conocimiento fundamentado investigativamente sobre que está permitido realizar y hasta que límite se puede realizar el estudio.

Cabe recalcar que el presente proyecto investigativo tiene la ventaja de ser parte de futuras investigaciones en post del desarrollo investigativo automotriz.

## Capítulo II

### Marco de Referencia

#### 2.1. Introducción

Para poder entender a qué se refiere un análisis estructural de un componente mecánico es necesario tener de manera consolidada los conceptos con los que se relaciona a este tipo de estudios los mismos que serán parte de las herramientas principales para alcanzar los objetivos planteados y así obtener un conjunto de valores y respuestas que determinan la acción de todos los esfuerzos mecánicos que actúan sobre la estructura.

Dentro de los elementos que son parte del motor de combustión interna se tiene uno de suma importancia como lo es el cigüeñal que es un eje que posee en su constitución varios codos o también conocidos como muñones, los mismos que en cada uno de estos se ajustan las bielas las mismas que cumplen una función muy importante que no es más que transformar el movimiento rectilíneo que emite el pistón junto al cilindro en movimiento rotativo con recibe el cigüeñal o viceversa, por lo que se pudiera considerarlo como un uno de los elementos de mayor importancia del mecanismo denominado tren de potencia del motor de combustión interna.

#### 2.2. Antecedentes de Análisis por Fatiga

Para poder desarrollar el presente proyecto investigativo se debe realizar un conjunto de investigaciones previas que permitan recabar información, así como metodología que permitan proyectar el estudio o encaminarlo en búsqueda de la obtención de los objetivos planteados.

Dentro del estudio estructural de elementos sometidos a esfuerzos dinámicos o estáticos, estos pueden algún momento presentar fallas de fatiga las mismas que sus causas pueden ser diversas y más no solo involucradas en el fenómeno asociado o conocido como

daño o plasticidad, así como roturas provocadas por un comportamiento denominado periodo elástico del comportamiento del material.

Estas roturas por fatiga se asocian principalmente con el inicio de una falla que a menudo al inicio del fenómeno no pueden presentar fallos inminentes, siendo estas presentadas de forma repentina y sin provocar deformaciones plásticas del mecanismo y por ende un colapso en el sistema donde se desempeña.

Existen muchos estudios y bibliografía relacionada a este tipo de fenómeno como lo son las fallas estructurales, así como de manera puntual a las fallas estructurales de cigüeñales en motores de combustión interna en las que se han encontrado algunas causas como se detallan a continuación:

- Daño de cigüeñal de un motor de combustión interna debido a esfuerzos cortantes provocados por fricción inusual por parte de las superficies del casquillo y eje, debido a un mal proceso de reparación, así como un proceso inadecuado de ensamblaje.
- Falla estructural de un cigüeñal determinado por la influencia directa en esfuerzos residuales en el área conocida como filetes de cigüeñal al momento de la fabricación debido a la presencia de una falla por fatiga del material, el mismo que se llegó a esta conclusión a través del estudio y aplicación de elementos finitos.
- Otro tipo de falla por rotura determinado a través de un estudio del comportamiento del cigüeñal se llegó a la conclusión que este se dio por un incorrecto proceso de rectificado de los muñones ya que presentó una incorrecta lubricación y una excesiva profundidad en el corte, lo que provocó una elevación considerable de temperatura sobre dichas superficies de contacto, lo que

provocó la generación de fisuras debido a fatiga térmica sobre el elemento en estudio.

### **2.3. Fundamentos de la Fatiga**

El cigüeñal de un motor de combustión interna trabaja con un conjunto de cargas y entre estas están las cargas variables, las mismas que al transcurrir su tiempo de funcionamiento lo que provocan son roturas en el elemento mecánico, pero con la referencia que sus valores de tensión son altos en comparación a las cargas en la que su amplitud es constante, pero en este punto se presenta una contradicción ya que al momento de analizar los esfuerzos máximos estos presentan un comportamiento de valores menores a la resistencia a la fluencia, y esta característica que se presenta de manera notable provoca este tipo de fenómeno en los que las cargas son repetitivas en un valor muy alto de repeticiones y de esta manera lo que se obtiene es un fenómeno que también se lo suele denominar falla por fatiga.

Así mismo se tiene la influencia de algunas normativas internacionales como lo es la ASTM con sus siglas en inglés que tienen su significado de Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, que es la organización que determina el proceso del cambio estructural consecutivo, progresivo y puntual, que sucede en un determinado punto del material sometido a tensiones así como a deformaciones de amplitud variable, provocando de esta manera grietas o fisuras las mismas que al final terminan en fractura total por medio de un número de ciclos.

En lo concerniente a cigüeñales como elemento fundamental de un motor de combustión interna estos son elementos que se encuentran sometidos constantemente a un número considerable de esfuerzos cíclicos durante su funcionamiento.

La determinación de una falla por fatigas sobre una sección del elemento de manera visual se da principalmente en el filete del cigüeñal, por el motivo de ser dinámica, así como por ser geoméricamente en un cigüeñal la sección la región más crítica del componente.

Teniendo en cuenta que un cigüeñal debe soportar todos los esfuerzos generados por su funcionamiento, así como por la cantidad repetitiva de ciclos que en un promedio suelen estar por muchos kilómetros u horas dependiendo su aplicación que va de una a otra reparación del motor o como mantenimiento correctivo.

Por este motivo es que una fractura de este tipo que, al estar sometido a ese tipo de cargas, las grietas empiezan en una sección muy cercana al filete que son las partes más comunes al momento de generarse una falla de estas características dentro de un motor de combustión interna.

#### **2.4. Características de la Rotura de un Elemento por Fatiga**

Este tipo de fenómeno como lo es una fractura de un cigüeñal en un motor de combustión interna se origina en un determinado punto en el que se concentran las tensiones sobre la superficie de rotura.

Por lo que esta concentración de cargas por fatiga tanto mecánicas como térmicas generan un resultado de las grietas iniciales para que se produzca este fenómeno y este determina muchas veces las características de la información del trabajo a que estuvo sometido el elemento, así como de qué manera se produjo la falla o rotura, lo que hace que se provoque este fenómeno.

#### **2.5. Estudio de Fatiga**

La cronología que genera una grieta o la conjunción de varias grietas en la superficie de un elemento mecánico al ser sometido a fatiga posee generalmente tres etapas, las mismas que son las siguientes:

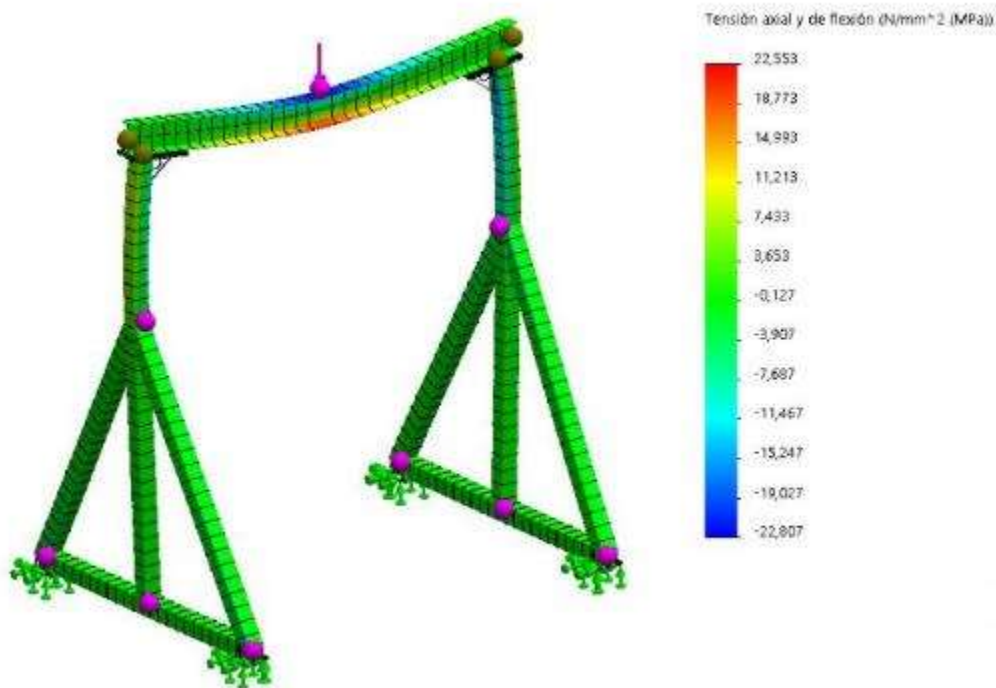
- Etapa de iniciación
- Etapa de propagación estable
- Etapa de propagación acelerada

De estas tres etapas la última es la que llega a generar finalmente en un elemento su rotura.

Dentro del análisis sobre estos tipos de fatiga estructural permite manejar herramientas que admiten evaluar además la validez del diseño y su durabilidad, cuando el componente es sometido a cargas simples o cargas complejas, siendo estas conocidas en el estudio estructural como cargas de servicio, cabe recalcar que se deben tener muy en cuenta cada uno de los valores de carga a las que se pueden someter y como estas se comportan en un estudio estructural por medio de la simulación del elemento en funcionamiento, como se muestra en la figura 1.

**Figura 1**

*Cargas Puntuales Sobre Elemento Estructural*



Fuente: Dassault Systemes (Aron, 2019).

## 2.6. Diagrama de Fatiga S-N

Para poder interpretar a que se refiere el manejo del diagrama de fatiga S-N, primero se debe tener conocimiento de aplicación una máquina de ensayos, ya que a través de un conjunto de pruebas en las que las muestras son sometidas a la aplicación de un esfuerzo específico y de manera cíclica hasta llegar a su falla, todos los resultados obtenidos son ingresados por medio

de una gráfica en la que se representa el esfuerzo representado con la letra S como ordenada y así mismo el número de ciclos representado con la letra N a la falla como abscisa, a lo que este tipo de diagrama es conocido como de esfuerzos-ciclos o diagrama S-N.

Para el caso del estudio planteado como lo es el caso del cigüeñal del motor de la vehículo Isuzu D-Max 2.5L inicialmente se realiza metodologías utilizadas en otros casos en lo que se puede encontrar que su inicio se presenta con un estudio de rotura por fatiga de los componentes mecánicos pero estos lo atribuyen que su origen se genera por alguna imperfección en el material con que fue elaborado el elemento y entre estos está: contaminación o inclusiones extrañas en el proceso de fundición, discontinuidades, etc. Por lo tanto, para poder realizar el estudio de este tipo de fenómeno de fatiga y buscando un proceso idóneo se aplica el uso de una máquina que permite hacer ensayos a través de probetas, pero estas deben ser preparadas con anterioridad ya que debe cumplir con algunas características como que su sección debe ser circular, para así poder aplicar un esfuerzo de flexión fijo para posteriormente darle un movimiento de giro.

Cabe aclarar que este procedimiento debe estar regulado bajo una normalización en cuanto a las características geométricas del diseño de las probetas, así como las condiciones de laboratorio idóneas, así como las características ambientales, lo que permite que el ensayo de viga rota se dé bajo todas las condiciones controladas.

Para que el ensayo sea eficiente este debe ser repetitivo o de manera múltiple, refiriéndose en este caso que como mínimo se recomienda que debe de realizarse ocho veces, pero variando el esfuerzo de flexión, para de esta manera poder obtener un determinado número de ciclos que es lo que dura la probeta.

Así mismo se debe tener en cuenta que esta repetitividad en cuanto a ensayos va a generar una gráfica de curva que se la denomina Wöhler, pero también se la conoce como curva S-N o curva de fatiga y lo que básicamente representa es cuánto dura la probeta bajo estas



condiciones en el ensayo la mismo que se encuentra expresada en el número de ciclos hasta que este alcanza su punto de rotura, pero en función al esfuerzo o carga a la que fue aplicada durante el proceso.

Analizando la curva generada el esfuerzo que se denota en el eje de coordenadas expresa la carga constante de flexión a la que se encuentra sometida la probeta para dicha carga y de esta manera se registra al número de ciclos de la viga que se necesitan hasta llegar al punto de rotura o falla de la probeta, para de esta manera obtener un punto en el diagrama.

Este proceso se continua, pero con la condición que el esfuerzo la carga a la que está aplicada la probeta logrando así obtener una curva completa la mismo que permite interpretarla con mayor claridad, como se muestra en la figura 2.

**Figura 2**

*Generación de Diagrama de Fatiga S-N*



### 2.7. Zonas en el Diagrama de Fatiga

Cuando se analiza un diagrama de fatiga correspondiente a un elemento metálico claramente se pueden apreciar tres zonas muy definidas y de muy fácil comprensión para su respectivo análisis, las mismas que son las siguientes:

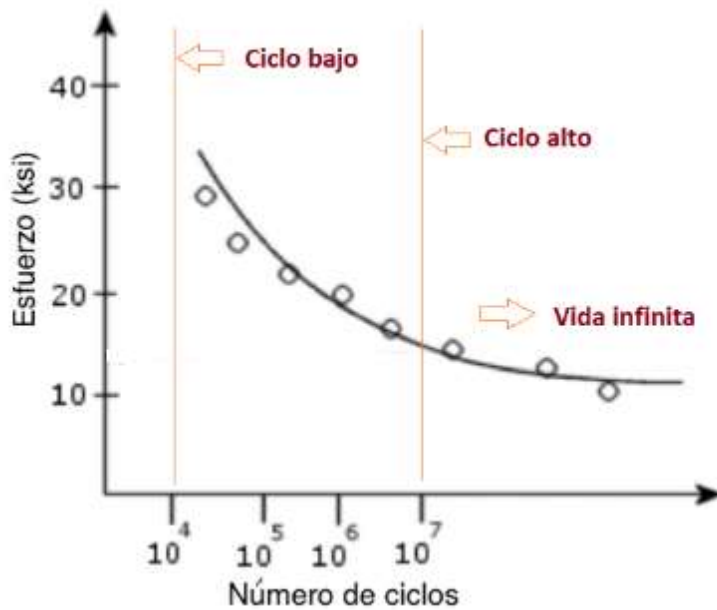
- Zona de ciclo bajo
- Zona de ciclo alto
- Zona de vida infinita

Para iniciar con la interpretación de la zona de ciclo bajo, esta es considerada normalmente cuando su rango se encuentra generalmente mayor a los  $10^3$  ciclos e inferior a los  $10^4$  ciclos, en la que el comportamiento del material actúa de manera similar a cuando el elemento está siendo sometido o soportando cargas estáticas, pero a su vez presenta una pequeña reducción de su resistencia.

Para el caso de la zona de ciclo alto esta se encuentra establecida en el rango de entre  $10^6$  o  $10^7$  ciclos en el caso de los aceros esto se establece por algunos investigadores, así como varias fuentes bibliográficas. Lo que establece esta zona es que el comportamiento del material es mucho más duro, pero se tiene la consideración al mismo tiempo es que el material del elemento se comporta de una diferente manera a cómo actúa cuando está sometido a cargas estáticas.

En el caso de la zona denominada como vida infinita, aquí se presenta un fenómeno de comportamiento en el que el valor de tensión muy inferior en el que la duración de la probeta sometida al ensayo es infinita, lo que significa que en el proceso no llega a romperse. En cuanto a la tensión que se aplica al momento que se realiza esta prueba y produce este efecto se lo denomina como límite de la viga sin corregir o límite de la viga rotatoria.

Las tres zonas bien definidas se pueden observar en la figura 3, tomando en cuenta que es un ensayo con una probeta de acero.

**Figura 3***Zonas de Diagrama de Fatiga*

### 2.8. Factores de Varían el Límite de Resistencia a la Fatiga

El tomar en cuenta estos factores son de suma importancia para el estudio estructural por el motivo que la influencia a la que se encuentra sometida las inclusiones en la resistencia a la fatiga sobre el material del elemento es estudio no solo depende del tipo, tamaño, forma, naturaleza, número y de la distribución de las inclusiones, sino que a su vez depende del nivel de resistencia que contiene el material, así como es estado y nivel de tensión aplicada sobre dicho componente en estudio.

Existen algunos modelos matemáticos que influyen sobre este tipo de análisis y uno de estos es el de Marín, el mismo que gobierna el análisis del límite de resistencia a la fatiga, así como genera una identificación de ciertos factores que cuantifican los efectos de la condición superficial del elemento en estudio, nivel de temperatura, su tamaño entre otros factores adicionales.

A continuación, se presentan algunos de estos tipos de factores:

### 2.8.1. Factor de Superficie ( $k_a$ )

Este es uno de los factores muy importantes al momento de realizar el estudio el mismo que se basa en corregir el efecto de acabado, esto quiere decir, la diferencia que se puede presentar entre la terminación pulida longitudinal que presenta la probeta del estudio y el acabado superficial direccionado al elemento de máquina, pero cabe tener en cuenta que muchas veces este tipo de elementos no presentan un acabado de calidad.

En definitiva, este tipo de factor de modificación dependerá directamente del tipo de calidad en el acabado superficial, así como de la resistencia superficial que posee el elemento en estudio.

Ahora la explicación que se fundamenta para la reducción del límite de fatiga determinado por el acabado superficial se basa en la existencia de una mayor rugosidad que presenta la probeta, esto hace que se presente un fenómeno de concentración de esfuerzos sobre la misma.

En la figura 3 se puede apreciar una tabla que presenta tipos de coeficientes y exponentes dependiendo del acabado superficial que se presente

**Tabla 1**

*Coefficientes y Exponentes en Función del Acabado Superficial*

<b>Acabado Superficial</b>	<b>Coefficiente a (MPa)</b>	<b>Exponente b</b>
Pulido	1	0
Acabado frío	1,58	-0,085
Mecanizado sin acabar	4,51	-0,265
Laminado en caliente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

El modelo matemático que se requiere para la obtención de este factor se expresa en la ecuación

1.

### **Ecuación 1**

*Modelo Matemático para Factor de Superficie  $k_a$*

$$k_a = aS_{ut}^b$$

#### **2.8.2. Factor de Tamaño ( $k_b$ )**

Para poder determinar el factor de Marín en cuento al tamaño se requiere de un lote de pruebas considerable las mismas que generen datos que se los relacione ciertas cargas, pero tomando en cuenta que para la carga axial del elemento no se considera el tamaño de acuerdo a cargas de flexión y torsión, para lo cual bajo esta consideración se toma que el  $K_b$  es igual a 1, pero para la obtención del factor de tamaño en casos de una geometría rectangular se consideran modelos matemáticos, entre estas consideraciones se tiene que se la sección no es circular pero tomando en cuenta una dimensión efectiva, también se toma en consideración si la sección transversal del elemento no es redonda y sometida a esfuerzos máximo que bordea casi al 100%

#### **2.8.3. Factor de Carga ( $k_c$ )**

La consideración a tener al realizar ensayos de fatiga, pero con aplicación de carga de flexión rotatoria, torsión y axial, pero sus límites de resistencia a la fatiga irán variando considerablemente según el tipo, como puede ser el caso de  $k_c$  para esfuerzos de:

Flexión de 1

Axial de 0.85

Torsión de 0.59

#### **2.8.4. Factor de Temperatura ( $k_d$ )**

Según al ambiente en que opera el elemento este se encuentra sometido a una temperatura que puede ser variable o constante, pero a través de dicha consideración se tiene los siguientes:

- Temperatura de operación es menor a la del medio ambiente en que opera el elemento, si se presenta un tipo de fractura esta es frágil, pero con cierta posibilidad de que sea fuerte.
- Temperatura de operación es mayor a la del medio ambiente en que opera el elemento. La resistencia de esta disminuye de una manera abrupta con la temperatura.

Bajo estas consideraciones se precisa que cualquier tipo de esfuerzo permite inducir a un flujo plástico en un material que se encuentre operando a altas temperaturas.

El comportamiento de un elemento constituido con un material presenta una curva característica en la que inicialmente incrementa inicialmente cuando la temperatura empieza a aumentar, pero apenas sigue aumentando este decrece de manera rápida.

En definitiva, existen dos consideraciones concretas en este punto y estas son:

- Resistencia a la tensión de temperatura ambiente.
- Resistencia a la tensión de temperatura de operación

### **2.8.5. Factor de Confiabilidad ( $k_e$ )**

Este tipo de factor se determina de acuerdo con las desviaciones estandarizadas a la resistencia a la fatiga, pero tomada en cuenta si es menor al 8%, siendo de esta manera un factor de confiabilidad el mismo que se lo puede obtener a través de un modelo matemático expresado en la ecuación 2.

#### **Ecuación 2**

*Modelo Matemático para Factor de Confiabilidad  $k_e$*

$$k_e = 1 - 0.08 * Z_a$$

### **2.9. Esfuerzos Fluctuantes**

Constantemente los esfuerzos fluctuantes que actúan directamente durante el funcionamiento de la maquinaria adquieren la forma gráfica de un patrón sinusoidal, esto se

debe básicamente a la propia naturaleza o comportamiento propio de algunas máquinas rotatorias.

Por este motivo es de suma importancia conocer cuáles son las fuerzas máximas y mínimas para de esta manera lograr caracterizar el patrón de fuerzas.

Durante el estudio se puede llegar a observar el comportamiento de las gráficas de tres relaciones de esfuerzos como lo son: a) esfuerzo fluctuante, b) esfuerzo repetido y c) esfuerzo completamente invertido.

## **2.10. Criterio de la Falla por Fatiga Ante Esfuerzos Variables**

Al momento de realizar un estudio de fallas sobre un elemento, muy frecuentemente se presentan tensiones y esfuerzos fluctuantes en los que su valor medio es distinto a cero.

En ciertas ocasiones no se puede correlacionar con otra información experimental que no corresponda a los ensayos de flexión rotativa e influencia de tensión media no nula, y para estos casos se procede a calcular a través de varias relaciones empíricas que logran determinar el fallo de la vida establecida del elemento cuando sus tensiones alternantes y medias son diferentes a cero.

Según (Cruz, 2015) establece que: “Los enfoques más conocidos son los criterios de Goodman, Soderberg y Gerber”.

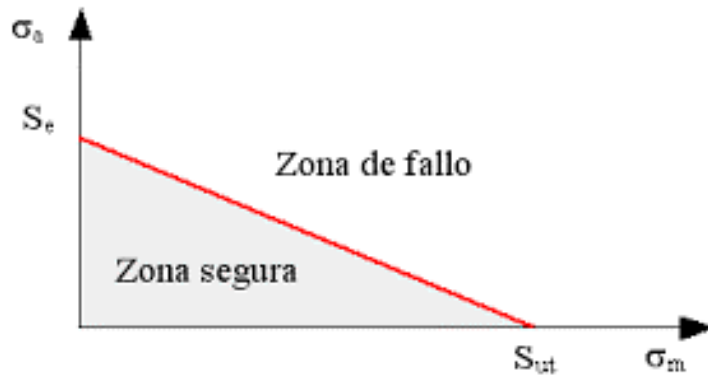
### **2.10.1. Criterio de Goodman Modificado**

Este criterio permite diferenciar con otros criterios ya que establece una condición en las que la tensión total en un punto de estudio analizado nunca supere el límite de fluencia esto quiere decir gráficamente la relación que se presenta entre la suma de las componentes medias y las alternantes.

Por ende, en la en la figura 4 se observa una gráfica es la línea que, representada la tensión media, frente a la tensión alternante y dicha línea representa la frontera del fallo producido sobre el elemento en estudio.

**Figura 4**

*Gráfica Representando Línea de Goodman*



El comportamiento de la gráfica describe la variación de la resistencia alternante en relación con la tensión media, lo que genera la línea con su respectiva pendiente que pasa por los puntos de coordenadas  $(0; S_e)$  y  $(S_{ut}; 0)$ , lo que representa el valor de la componente alternante con determinación para un fallo a  $N$  ciclos de  $S_e$  y en el caso de la tensión alternante nula es decir con carga estática, una resistencia media o también conocido como valor de tensión media para fallo  $S_{ut}$ .

Esta representación brinda una aceptable aproximación a la realidad y brinda una gran ventaja al ser expresada a través de una relación lineal, por este motivo en este tipo de estudio es uno de los más empleados.

### **2.10.2. Criterio de Soderberg**

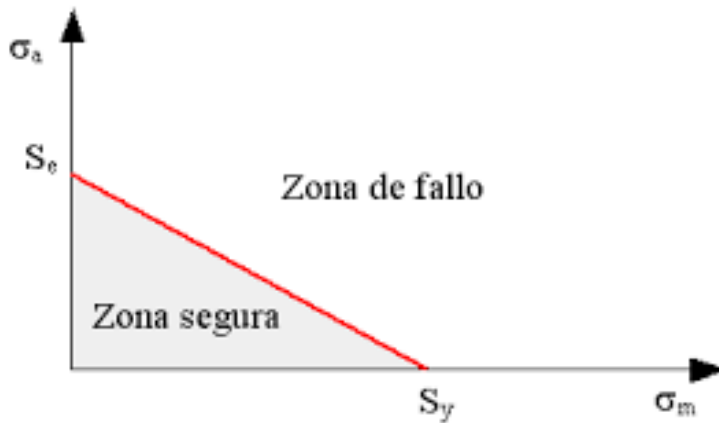
Este criterio en el estudio de fallas estructurales sobre un elemento mecánico es relacionado a la resistencia a la fatiga el mismo que es utilizado para el análisis de la resistencia en cuanto a las piezas que están sometidas a tensiones fluctuantes y con relación a componentes de tensión media positiva.

Por lo tanto, cómo se puede apreciar en la figura 5, este tipo de teoría es lineal y su objetivo es predecir el comportamiento que tiene la carga estática con el material del elemento en estudio.



**Figura 5**

*Gráfica Representando Línea de Soderberg*



Mayormente los resultados obtenidos en este tipo de teoría son excesivamente conservadores por este motivo este motivo es menos utilizado en relación al de criterio de Goodman.

### **2.10.3. Criterio de Gerber**

A través de este criterio se basa en la resistencia a la fatiga, pero es utilizando para el análisis de la resistencia de sus elementos que se encuentran sometidos a tensiones fluctuantes, pero con la condición de trabajar con elementos de tensión media positiva.

Claramente se puede observar en la figura 6, que el comportamiento de esta gráfica no es lineal, por motivos que la generación de la misma es de forma parabólica cuyo vértice inicial se genera en el punto con coordenada  $(0; S_f)$ , y la representación de su eje pasa por el punto con sus coordenadas  $(S_{ut}; 0)$ .

Este comportamiento de la gráfica representada denota como la rotura generada a  $N$  ciclos.

**Figura 6**

*Gráfica Representando Ciclo de Gerber*



### 2.11. Factor de Seguridad por Carga Estática

Al referirse de la capacidad de carga estática básica, esta se sustenta en el comportamiento, pero tomando en cuenta la magnitud constante y su dirección, bajo la cual el tipo de esfuerzo de contacto es calculado en la parte central del área de contacto entre la ranura y el rodillo, pero teniendo en cuenta que es bajo la carga máxima equivalente a un número considerable en mega pascales.

Así mismo algunos esfuerzos como el de Von Mises se encuentran relacionados con los esfuerzos principales del ensayo.

Por lo que al introducirlos al estudio modelos matemáticos propios del estudio indican que una situación determinada de esfuerzos complejos puede ser presentada a través de un solo valor.

En definitiva, el coeficiente de seguridad por carga estática o también conocido como factor de seguridad no es más que el cociente entre el valor calculado entre la capacidad máxima de un sistema con el valor del requerimiento deseado real a que el elemento será sometido para su estudio.

Para poder interpretar correctamente lo expuesto anteriormente este factor de seguridad de Von Mises, este será presentado a través de una relación de 5 a 1, con su representación numérica (5:1).

Este factor es calculado a través de la relación entre la tensión máxima permitida y la tensión equivalente, siempre y cuando se haya utilizado el límite de elasticidad.

Este valor obtenido debe ser mayor a 1 para que el diseño sea correcto o aceptable ya que un valor inferior a 1 indica directamente que en el ensayo sobre un elemento o mecanismo en este existe una deformación permanente.

## **2.12. Factor de Seguridad por Carga Dinámica**

Cuando se analiza una carga dinámica pues está representa la resistencia que soporta un elemento o mecanismo cuando el sistema se encuentra en movimiento, pero se debe considerar que cuando se realiza este tipo de análisis con carga no proporcional de amplitud constante y su relación con el esfuerzo permitido, esta generará una gráfica de esfuerzo repetido y a su vez por la variación de condiciones se deben considerar dentro de sus modelos matemáticos algunos factores como lo son:

- Factor de intensidad modificador de la fatiga
- Módulo de fatiga
- Magnitudes de salida
- Intensidad de esfuerzo
- Esfuerzo cortante provisional
- Esfuerzo cortante máximo, entre otros

## **2.13. Absorbedores de Vibración**

Básicamente los absorbedores de vibraciones no son más que un sistema vibratorio que a través de un mecanismo masa y resorte relativamente pequeño cumple la función de acoplar a la masa principal del mecanismo conocida con las siglas M1 y a su vez se encuentra

sintonizado de tal manera que cuando su frecuencia natural sea igualada a la frecuencia con sus siglas  $W$  de la fuerza perturbadora o excitatriz del sistema principal.

En definitiva, no es más que un dispositivo mecánico que se suele utilizar con el fin de disminuir o eliminar vibraciones indeseables producidas básicamente por el funcionamiento natural de un sistema mecánico.

#### **2.14. Tipos de Elementos Estructurales**

Dentro del campo del estudio de la mecánica existe un área determinada para el análisis estructural y para su estudio estas pueden ser clasificadas de acuerdo a su forma geométrica. Para elementos del tipo barra se refiere a los elementos que poseen una dimensión mayor que otras dos, refiriéndose en este punto a las que se pueden representar a través de una línea en el espacio más aquellas características de su sección transversal. Para los elementos del tipo muro o placa son los que poseen dos dimensiones similares y la otra es menor de manera significativa. Para el estudio estos elementos pueden ser observados en el espacio como planos de muy poco espesor.

Para su análisis estos elementos especialmente soportan varios tipos de cargas en menos o mayor grado y estas son:

- Tensión
- Compresión
- Flexión
- Cortante
- Torsión

Todos estos elementos tipo barra son denominados únicamente como elementos.

Dentro de la clasificación de tipos de elementos estructurales se tienen los siguientes:

- Elementos sometidos a tensión uniforme.
- Elementos sometidos a flexión y cortante.

- Elementos sometidos a compresión uniforme.

## 2.15. Tipos de Estructuras

Existen tres grupos de estructuras bien definidas, las mismas que son las siguientes:

- Estructuras reticulares
- Estructuras macizas
- Estructuras superficiales

## 2.16. Cigüeñal

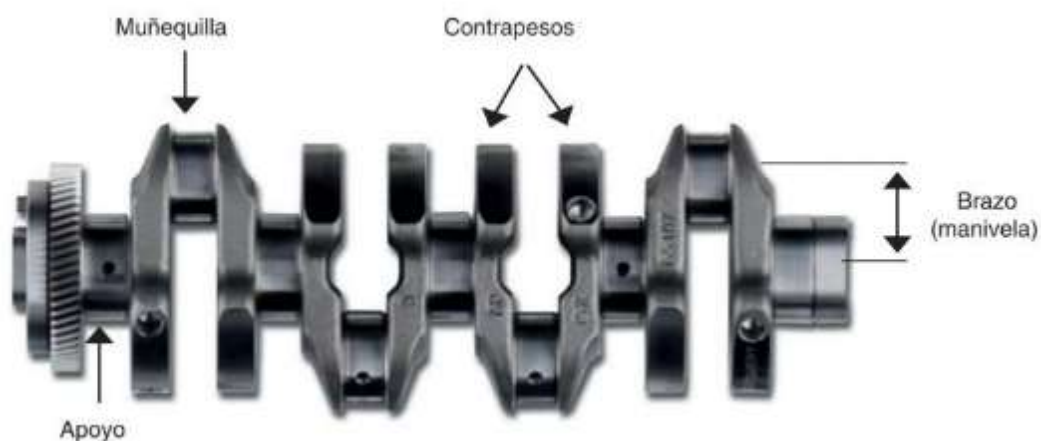
De acuerdo a la conceptualización de este elemento se establece lo siguiente: “es el elemento encargado de convertir la fuerza resultante de los gases tras la combustión, en un par de giro que se transmitirá posteriormente a la cadena cinemática del motor” (González, 2018)

Para el estudio o comprensión física y estructural este elemento posee las siguientes partes como se pueden observar en la figura 7.

- Apoyos
- Muñequillas
- Brazo o manivela

**Figura 7**

*Partes Principales del Cigüeñal.*



Fuente: (González, 2018)

Así mismo posee otras partes como lo son:

- Muñón de apoyo
- Muñón de biela
- Muñón de bancada
- Orificios de lubricación
- Brazo del cigüeñal
- Taladrado de equilibrio
- Tornillería de volante
- Contrapesos
- Porta chaveta

La función principal que cumple el cigüeñal dentro de un motor de combustión interna de 2 o 4 tiempos es la de convertir el movimiento lineal generado por el pistón junto al cilindro en movimiento circular, pero tomando en cuenta que estos elementos se encuentran conectados a través de la biela. Algunos creadores de contenido bibliográfico también lo suelen llamar eje de motor o árbol de manivelas.

Entre las fallas más comunes que presente este elemento suele ser el rallado de los muñones de biela y o bancada, así como la rotura por fatiga, provocando de esta manera ruido cuando el motor entra en funcionamiento y se agudiza cuando este varía su aceleración, para poder visualizar este tipo de falla se debe estrictamente desmontar el cigüeñal del bloque de cilindros del motor.

Las causas por las que suelen ocurrir este tipo de fallas de roturas sobre un cigüeñal se encuentran las siguientes:

- Vibraciones de torsión excesivas
- Contrapesos sueltos
- Bloqueo repentino del motor producidos por el cambio averiado

- Sobrecarga mecánica del cigüeñal por fallos en la combustión
- Fallo en proceso de rectificado que provoque eliminación de empalme entre muñón y paredes de contrapesos.

### 2.17. Software

Un software no son más que programas, métodos de funcionamiento o datos a modo de instrucciones que cumplen la función de los equipos informáticos cumplir con determinadas tareas, teniendo en cuenta que estos no solo son utilizados a través de un ordenador, sino que también pueden ser aplicados como una herramienta en otros tipos de dispositivos como lo son maquinarias, consolas, dispositivos móviles, etc.

Para el caso de software que se utiliza en el presente proyecto investigativo pertenece a la empresa AutoDesk con su programa Inventor el cual es un software que permite generar el modelado del cigüeñal en sólido de 3D de manera paramétrica, así mismo brinda las todas las herramientas profesionales, así como específicas para el diseño mecánico en 3D, simulación y generación de informes. Su logo de identificación dentro de la plataforma de Autodesk se lo puede apreciar en la figura 8.

#### **Figura 8**

*Ícono Software Inventor.*

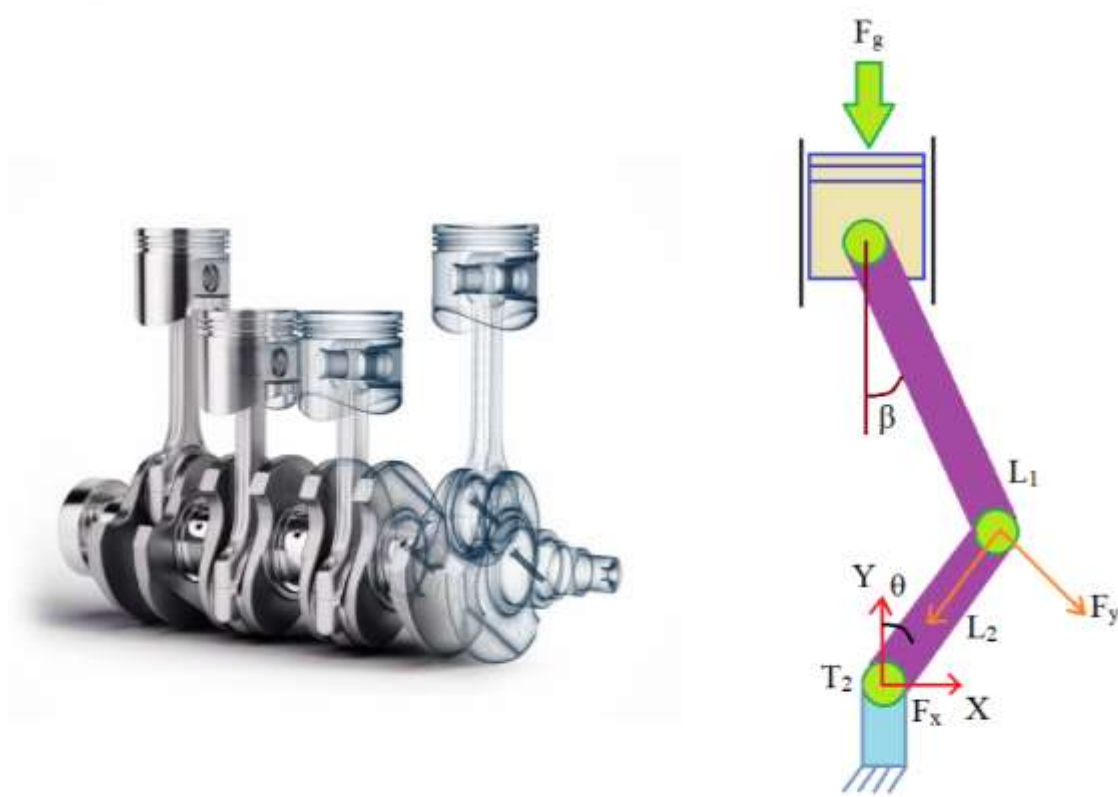


## 2.18. Análisis Estructural sobre Cigüeñal con Cargas Estáticas

Para la realización de este tipo de análisis estructural estático de debe considerar cada uno de los elementos que se encuentran relacionados de manera directa y que influyen sobre el cigüeñal de motor y de manera puntual sobre los muñones. Estos esfuerzos dependiendo de la ubicación del mecanismo de descomponer de la manera que se muestra en la figura 9, la misma que describe dos elementos fundamentales como lo son el componente  $F_x$  y  $F_y$ .

**Figura 9**

*Cargas Estáticas que Soporta un Cigüeñal*



La respectiva aplicación de los modelos matemáticos permite conocer los esfuerzos máximos de Von Mises, así como cada una de sus deformaciones, también se determina el factor de seguridad mínimo a través de la teoría de Goodman.

Se debe tomar muy en cuenta que el funcionamiento de los motores alternativos siempre se encuentra en movimiento rotativo y por ende se genera un momento de estas características que se lo conoce como par motor.



El par motor se lo consigue a través de una secuencia de eventos como lo es en primer lugar la combustión generada sobre la cabeza del pistón, la misma que se convierte en una fuerza que ejerce sobre el pistón.

Al girar el mecanismo pistón biela, este adquiere una inclinación por parte de la biela, descomponiéndose de esta forma en una fuerza lateral y en la fuerza en el sentido de la biela, para luego finalizar directamente sobre el muñón del cigüeñal, el mismo que dependerá definitivamente de su ubicación o posición en la trayectoria circular del elemento, para lo cual por este factor la fuerza se descompone en una fuerza sobre el brazo del cigüeñal y una fuerza tangencial del mecanismo.

### **2.19. Método de Elementos Finitos**

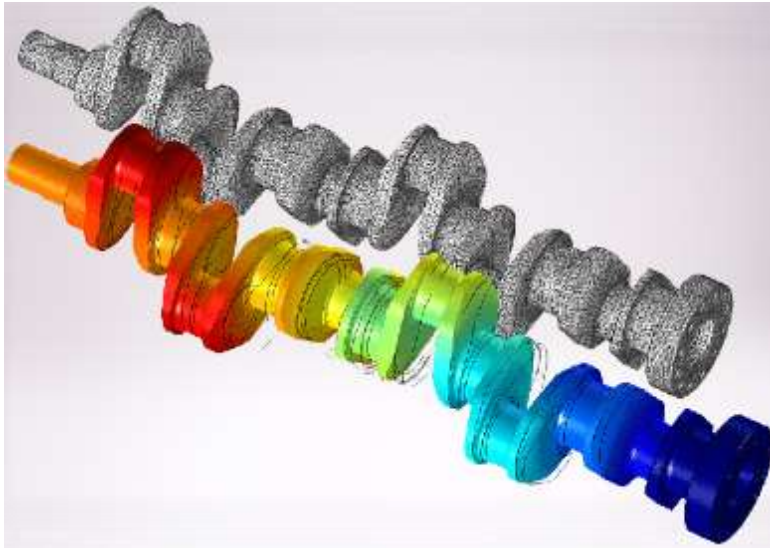
La complejidad de la geometría de elementos o piezas hace que muchos de sus cálculos se vuelvan difíciles o hasta imposibles en cuanto a esfuerzos, así como las deformaciones que este puede presentar si se aplica un cálculo bajo técnicas convencionales.

Para el caso del cigüeñal, este es un elemento con una geometría compleja en el que realizar un análisis de esfuerzos y deflexión se convierte en un proceso casi imposible de llegar a la exactitud de sus resultados si se utilizarían modelos matemáticos tradicionales, pero por medio de elementos finitos se puede llegar al objetivo ya que este divide todo su volumen convirtiéndolo en un conjunto de elementos finitos discretos continuos y enlazados denominados nodos, resolviéndolos a través de ecuaciones simultáneas.

Esta conceptualización por medio del análisis lineal de elementos finitos se representa por las siglas FEA y suele ser muy sencillo por parte del software debido a un paquete de análisis, de los cuales permite generar un modelado espacial y simulación del comportamiento del elemento bajo cada una de sus cargas con las que trabaja, esto lo podemos observar en la figura 10.

**Figura 10**

*Aplicación de FEA Sobre Cigüeñal.*



### ***2.19.1. Cálculo de Esfuerzos y la Deformación***

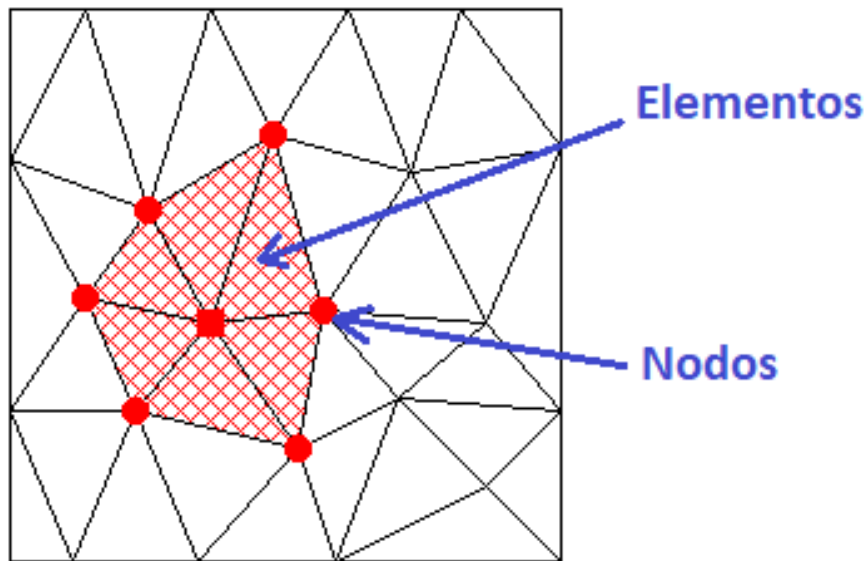
Para proceder a realizar el cálculo de esfuerzos y deformación sobre un elemento mecánico se debe tener en cuenta que el esfuerzo incide constantemente sobre la pieza ya sea cuando este se encuentra de manera estática como dinámica.

Por lo que para su respectivo análisis del comportamiento lo que se pretende es proceder a dividirla en un número finito, pero con la condición que estos elementos sean discretos, así como que todos sus nodos se encuentren conectados y esto se conoce como mallado, como se puede observar en la figura 11.

Posteriormente lo que se logra es una aproximación de sus cargas y del comportamiento de deformación dentro del elemento para cualquier mecanismo bajo la designación de sus condiciones de restricción y las cargas aplicadas en los distintos nodos de su estructura. Este tipo de aproximación se ve mejorado significativamente cuando se aumenta la división de cada elemento esto quiere decir que cada elemento se lo divide en nodos de menor tamaño, pero esto influye directamente el tiempo que transcurre en el procesamiento de datos y resolución de análisis.

**Figura 11**

*Mallado y Descripción de Nodos y Elementos.*



También se puede utilizar elementos de mayor tamaño en regiones del elemento en donde el gradiente de cargas varía con lentitud, esto quiere decir que se puede utilizar un tipo de mallado grueso.

El uso de un mallado fino se lo aplica en los casos donde las regiones del gradiente de cargas varían rápidamente, como es el caso de las que se encuentran cerca de concentraciones de esfuerzos o de ciertas cargas en las que se concentran ciertas restricciones o esfuerzos aplicados de mayor concentración.

Para el análisis de elementos finitos se debe considerar que este no solo se limita al análisis estructural de un elemento o mecanismo, sino que también permite realizar otros procedimientos de cálculo como se los presenta a continuación:

- Mecánica de fluidos
- Acústica
- Transferencia de calor
- Electromagnetismo, entre otros

Así mismo permite resolver problemas de especialización, generación de información referentes a esfuerzos, deflexiones, deformaciones, modos de vibración y frecuencias naturales, análisis de impacto, vibración transitoria o conocida también como de estado estable de una estructura.

En la mayoría de softwares que se han diseñado para este tipo de metodología emplean un procedimiento utilizado para el análisis estructural por parte de elementos finitos es el de método directo de rigidez con sus siglas en inglés DSM, el mismo que usa elementos rígidos para poder calcular los desplazamientos nodales, así como las fuerzas internas las mismas que resultan de un determinado conjunto de tensiones externas aplicadas y bajo condiciones de frontera.

Este tipo de deformaciones suelen ser determinadas a partir de los esfuerzos y desplazamientos, partiendo básicamente de las deformaciones generadas a través de la ley de Hooke.

### ***2.19.2. Geometría del Elemento de Mallado***

Específicamente para el análisis de elementos finitos de un elemento o mecanismo se utilizan diversas formas geométricas. La forma de los diversos elementos a los que se pretenden realizar un análisis se los realiza por medio de códigos del propio software a ser utilizado en el análisis de elementos finitos a través de las conocidas como bibliotecas de elementos del código estructural, y estos pueden ser ubicados de la siguiente forma:

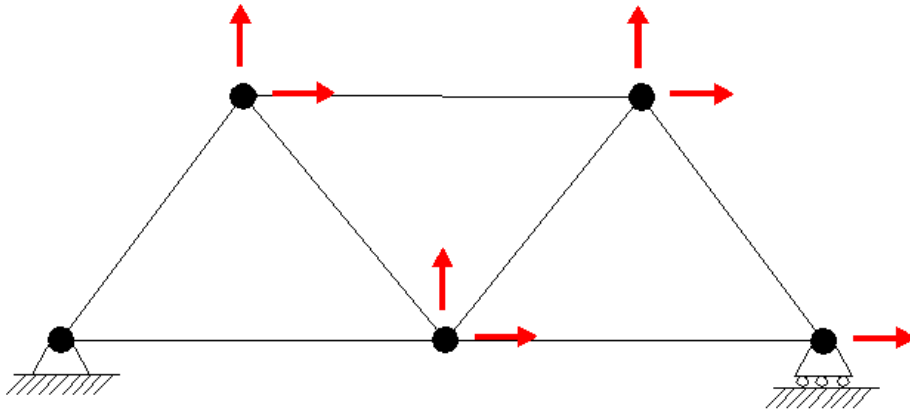
- Elementos de superficie
- Elementos de línea
- Elementos sólidos
- Elementos de propósitos específicos

Dependiendo su influencia estos proporcionan diversos tipos de elementos disponibles para el respectivo análisis de elementos finitos aplicados a problemas estructurales, pero con

la aclaración de que no todos los elementos suelen soportar cada uno de los grados de libertad aplicados, como se muestra en la figura 12.

**Figura 12**

*Grado de Libertad Globales en Nodos.*



### 2.19.3. Orden del Elemento Finito

Los elementos lineales poseen límites rectos mientras que los elementos de orden más elevados suelen tener límites curvos y a su vez poseen la habilidad de ajustarse de acuerdo al contorno geométrico del elemento en estudio si este presenta una forma compleja, manejando de esta manera gradientes de esfuerzo mucho más bruscos.

Pero cabe aclarar que el aumento en el orden de la pieza aumentaría de manera significativa su tiempo de procesamiento, por este motivo es que en la mayoría de analistas tratan en lo posible de primeramente modelar el componente con elementos lineales.

También se debe considerar que el fenómeno de deformación no es más que una función de la velocidad de acuerdo al cambio de su desplazamiento, por medio del elemento, el mismo que se calcula diferenciando la función de desplazamiento de la pieza o mecanismo en análisis. En el caso de que, de forma línea, de tetraedro o triangular, se debe aplicar la función de desplazamiento de la pieza es por línea recta y su deformación es constante. Lo que se logra con esto es que los elementos sean demasiado rígidos.

Las determinaciones de las cargas son determinadas por parte del módulo de elasticidad del material y de la deformación del elemento, por este motivo es que los nodos generados poseen esfuerzos constantes por medio de su dimensión.

#### **2.19.4. Comparación entre Elementos H y P**

Dentro de los procesos de análisis de elementos finitos se suelen utilizar elementos que se denominan elementos H así como elementos P, los mismos que se cumplen la siguiente descripción:

Para el caso de los elementos en H, estos suelen ser los más comunes pero su orden es limitado por lo general al método cuadrático por lo que se recomienda realizar una refinación a la malla, para de esta manera poder aumentar su número y así mismo reducir su tamaño por elemento en ciertas regiones donde el gradiente de cargas es alto.

En cambio, que los elementos en P, se aplica para generar orden de los polinomios en sus bornes por interpolación el mismo que se incrementa hasta 9, logrando de esta manera captar variación de cargas locales donde se lo amerite.

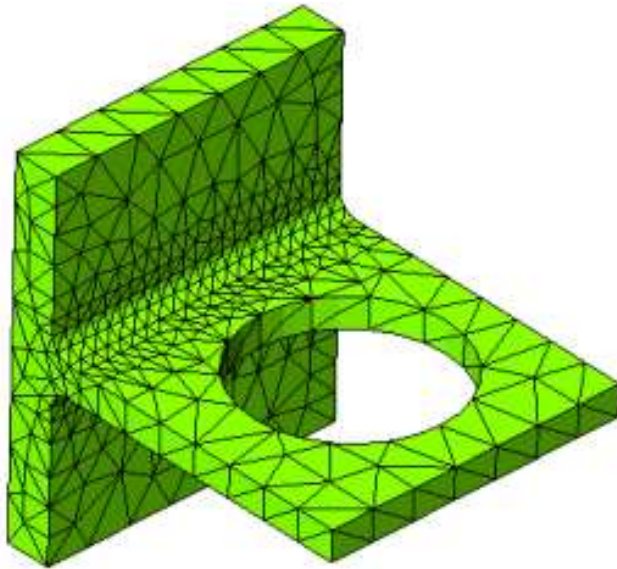
#### **2.19.5. Mallado**

Según el criterio de (Ríos, et al., 2020) establece que: El mallado es uno de los aspectos más importantes más importantes a tener en cuenta al momento de resolver una simulación en CFD, pues hacerlo de manera errónea puede generar resultados erróneos y problemas numéricos.

Dentro de este proceso es el de subdividir el elemento en pequeñas partes a las que se les denomina mallado, como se puede observar en la figura 13.

**Figura 13**

*Mallado de Elemento Sólido.*



Los softwares que se han diseñado para el análisis de elementos finitos toman en cuenta al modelado como una cadena de elementos interconectados, por este motivo el mallado de un elemento o mecanismo es crucial para este tipo de análisis de diseño, el mismo que consta de aristas, vértices y caras las mismas que usan una representación poligonal que incluyen a su vez triángulos y cuadriláteros que permiten definir su forma tridimensional, tomando en cuenta que los modelados sólidos poseen una gran diferencia con este tipo de mallado ya que la malla no posee propiedades de masa.

#### **2.19.6. Consideraciones de Frontera**

Existe una definición de frontera expresada por (Reyes, 2014) define que: En CFD las fronteras son los límites de los modelos físicos y a ellas se les asignan valores iniciales para resolver las ecuaciones diferenciales que los determinan.

Esto permite identificar cuáles son los límites que realmente establecen las restricciones sobre el elemento real, para así lograr una solución racional del problema aplicado, tomando en cuenta que cada nodo de la pieza posee un determinado grado de libertad ya sea en dos dimensiones por ende dos grados de libertad de traslación y en tres dimensiones que posee tres

grados de libertad de traslación. Así mismo se tiene que tener en cuenta que se debe aplicar restricciones superficiales que permiten eliminar todos los grados de libertad cinemática del elemento y colocarla en equilibrio estático.

También las conexiones físicas del elemento junto a los conectores de montaje deben ser modelados tan real como sea posible ya que estas condiciones no permiten restringir deformaciones que no pasen en la realidad. Otra consideración que se debe tomar en cuenta es que una restricción física no posee rigidez infinita, pero si se puede especificar que un nodo no pueda desplazarse en el análisis de elementos finitos, convirtiéndose de esta manera en realmente fijo e infinitamente rígido.

Lo que si se debe considerar es que, al aplicar demasiadas condiciones de frontera, el conjunto de mecanismos se sobrerestringe y lo que se logra finalmente es que este sea demasiado rígido.

#### **2.19.7. Cargas Aplicadas**

Para el desarrollo de simulación de un elemento estructural se proceden aplicar cargas o esfuerzos sobre el modelado, así como restricciones y condiciones, todas estas de manera adecuada y bajo criterios óptimos siendo estas las denominadas condiciones de frontera. Comúnmente estas cargas son aplicadas de forma cerrada como si estuvieran direccionadas a un solo punto, por el motivo que una carga es posible ser aplicada sobre un nodo individual, pero con la interpretación de que la carga real se encuentra distribuida sobre una porción finita del elemento, tomando en cuenta que si realmente se aplicara la carga en un punto determinado el esfuerzo local este sería infinito.



## Capítulo III

### Método de Modelado

#### 3.1. Herramientas para el Modelado y Análisis

Para iniciar con la parte metodológica del presente estudio de análisis estructural del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L, el mismo que presenta fallas de rotura como se puede observar en la figura 14, el mismo que presenta varias roturas dentro de su cuerpo, por lo que se procese a realizar una inspección visual del mismo, esto permite que se obtenga una visualización concreta tanto del componente como de su daño y entre estos se encontraron los siguientes:

- Pandeo de sus ejes principales.
- Rotura por cizalladura en contrapeso.
- Rotura en extremos de muñón de biela.
- Rotura en extremo de muñón de bancada.

#### Figura 14

*Cigüeñal de Estudio de Caso de Fractura.*



Luego de realizar la inspección se pudo evidenciar que su falla se presentó en varias partes del elemento como se puede observar en la figura 15.

**Figura 15**

*Cigüeñal Fraccionado por Falla Estructural.*



Observando el estado del cigüeñal se procede a la unión de sus fracciones como se puede observar en la figura 16, la misma que muestra la forma completa del elemento, pero tomando en cuenta que se posee todas las partes fraccionadas por la falla del elemento en estudio.

**Figura 16**

*Reconstrucción Tentativa de Cigüeñal Fraccionad.*



Una vez unidas e identificadas sus partes se procede a la toma de datos, así como medición de cada uno de sus componentes como se puede observar en la figura 17, esta acción permite registrar cada una de las medidas para lograr realizar el dibujo y modelado del componente en estudio.

**Figura 17**

*Toma de Datos Medibles del Cigüeñal.*



Esta fase inicial es de mucha importancia ya que el investigador recolecta los primeros datos, así como visualizaciones del cigüeñal antes de proceder a seleccionar con que software se procede a trabajar para la continuidad en lo concerniente a la metodología del presente trabajo investigativo.

### **3.2. Selección de Software para Análisis**

Luego de obtener la información inicial se procede a determinar con que software se trabaja para la obtención del dibujo, modelado y simulación del elemento en estudio y bajo esos parámetros se determina que un uno de los softwares que cumplen con estas características lo es Inventor de la empresa Autodesk.

Inventor es un software que permite la integración de datos tanto en 2D como en 3D en un mismo entorno generando de esta manera una representación virtual del producto final, de tal manera que se puede ajustar e inspeccionar el funcionamiento del producto en cualquiera de los momentos en el transcurso de la fase de diseño del elemento.

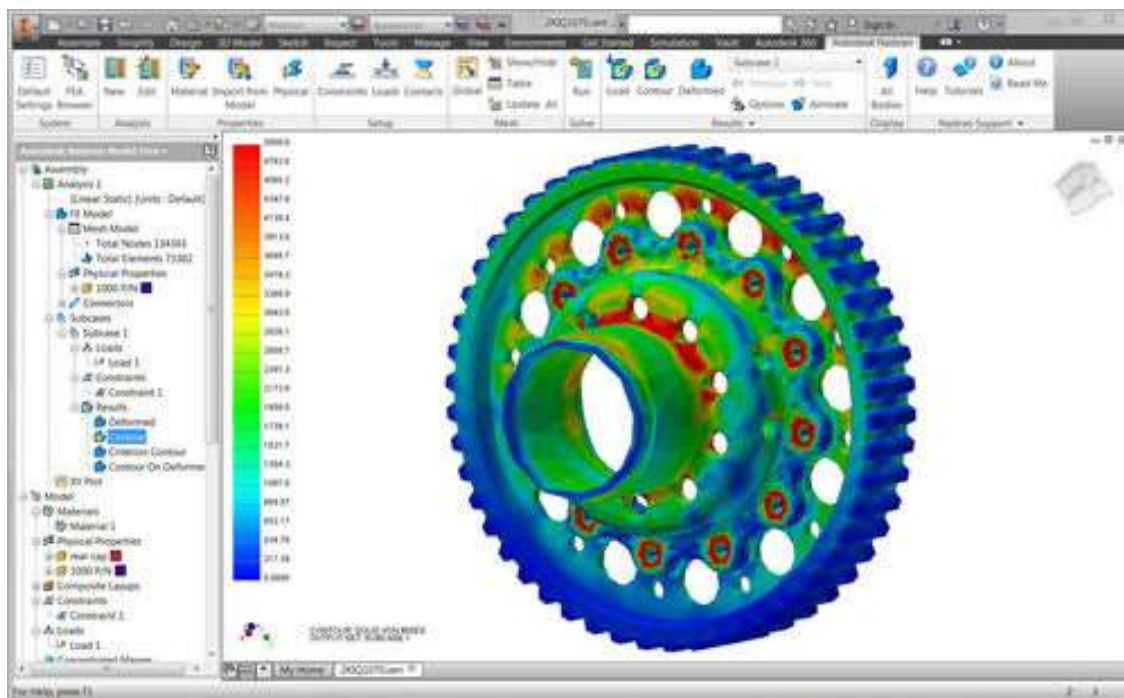
Básicamente las herramientas con las que cuenta el software Inventor de Autodesk son las siguientes:

- Diseño mecánico 3D.
- Documentación.
- Simulación de producto de calidad profesional.
- Combinación de capacidades de diseño paramétrico, directo, de forma libre y basado en reglas.

Uno de los ejemplos del uso de software Inventor se puede observar en la figura 18, en la que se representa el diseño de componente mecánico con su respectiva simulación de análisis estructural.

**Figura 18**

*Ejemplo de Uso de Software Inventor.*





Continuando con la metodología se procede a modelar el cigüeñal a través del software Inventor y los datos obtenidos, con los que se obtienen detalles del elemento en el dibujo como lo son:

- Orificios de lubricación.
- Bases de acople con volante de inercia
- Radios de cambio de sección
- Geometría de contrapesos inerciales
- Sección de tornillería para acoplamiento del volante de inercia
- Eje con porta chaveta

En la figura 19 se puede observar el modelado del cigüeñal en estudio.

### **Figura 19**

*Modelado de Cigüeñal en Inventor.*



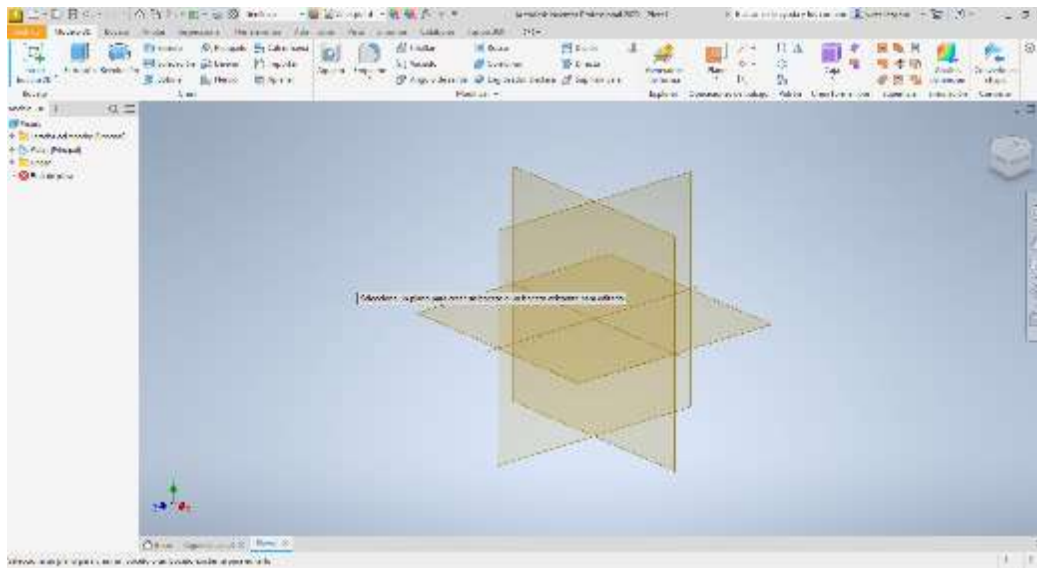
A continuación, se detalla el proceso que se lleva a cabo para la obtención del modelado del cigüeñal:

Para proceder a iniciar con un propósito como lo es el presente modelado del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5, se debe generar un nuevo proyecto en el que se almacenarán todos los elementos a ser generados.

Posteriormente se procede a crear una nueva pieza que para el caso de su inicio lo será en 2D, como se puede observar en la figura 20.

**Figura 20**

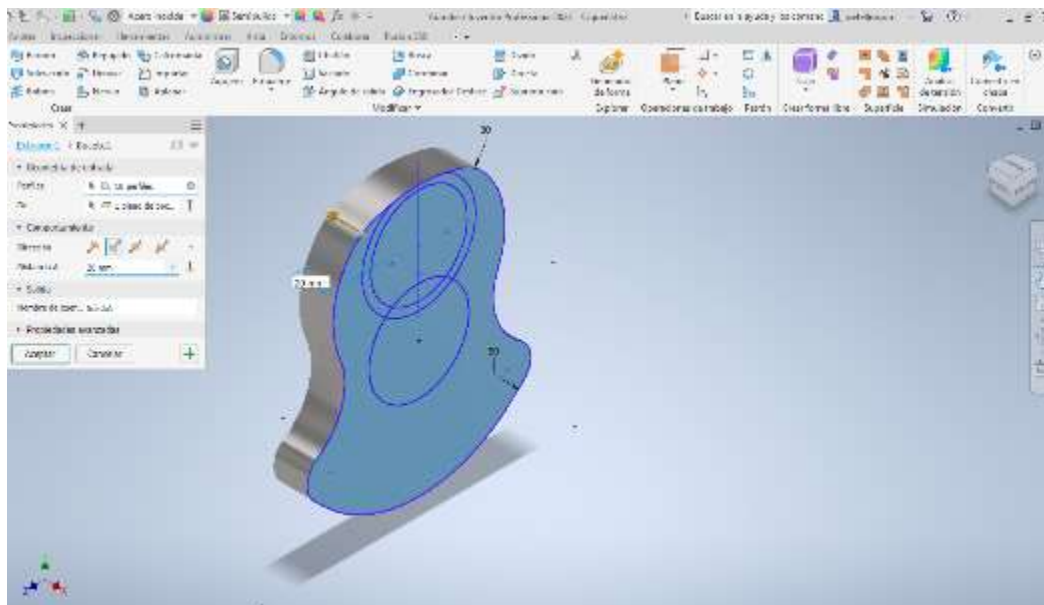
*Selección de Plano para Inicio de Proyecto.*



Con los datos obtenidos se procesa a generar el boceto de la forma geométrica que en este caso lo es del perfil de uno de los contrapesos en 2D, para posteriormente realizar el proceso de extracción del perfil, como se puede observar en la figura 21

**Figura 21**

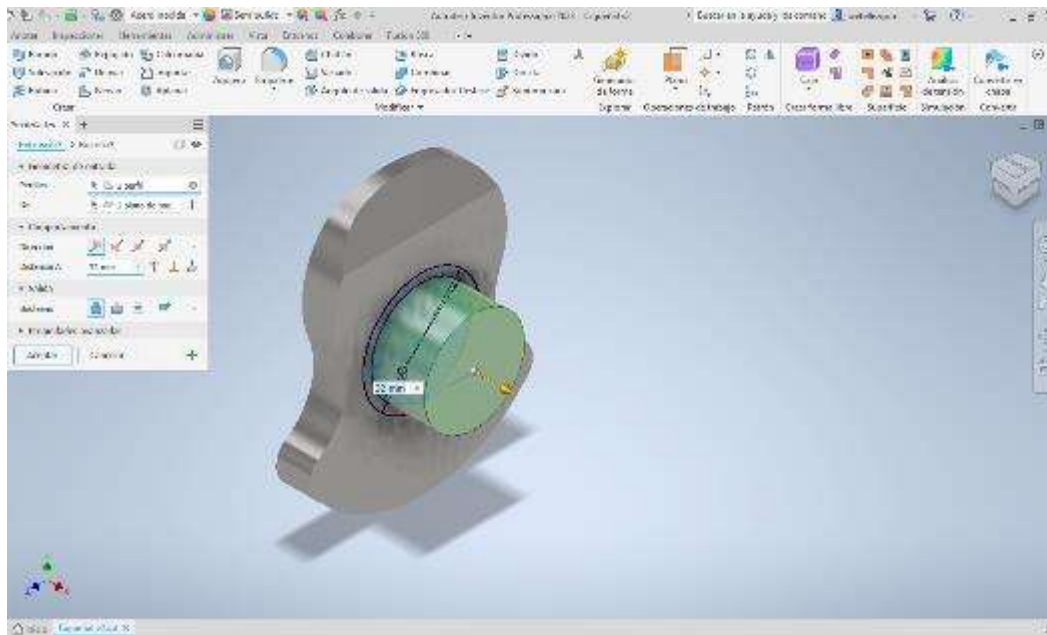
*Diseño de Contrapesos Exterior de Cigüeñal.*



Una vez generado el contrapeso se procede a realizar la creación de los muñones que para este caso lo es el de bancada, el mismo que se genera en el centro de la base del contrapeso del cigüeñal, como se puede observar en la figura 22.

**Figura 22**

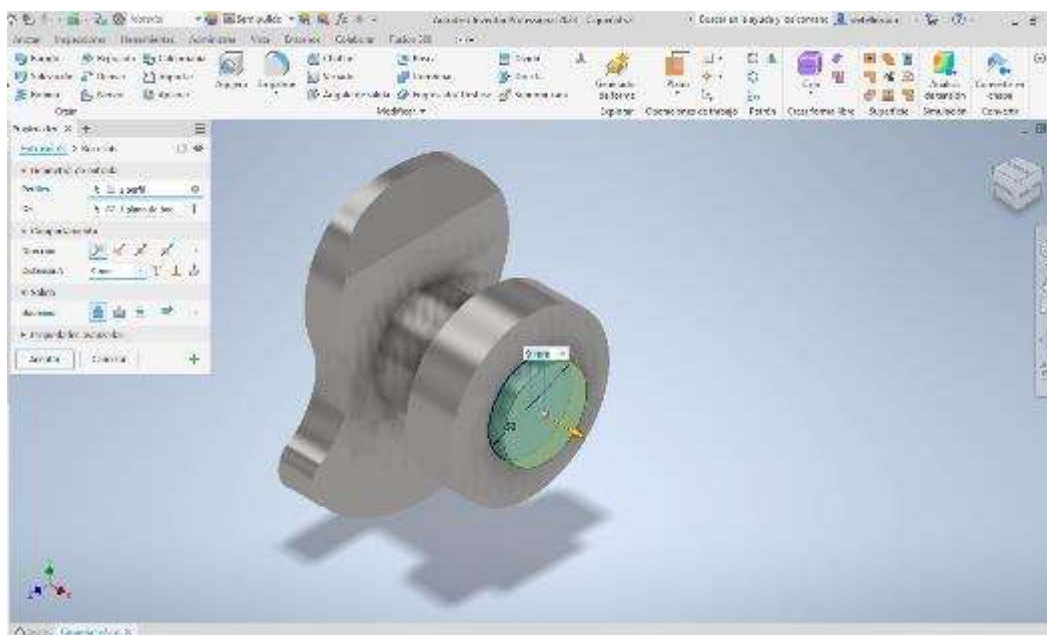
*Diseño de Muñón de Bancada de Cigüeñal.*



Una de las partes importantes del cigüeñal lo suele ser la base de acoplamiento con el volante de inercia el mismo que va colocado a un extremo de uno de los muñones de bancada del cigüeñal, como se muestra en la figura 23.

**Figura 23**

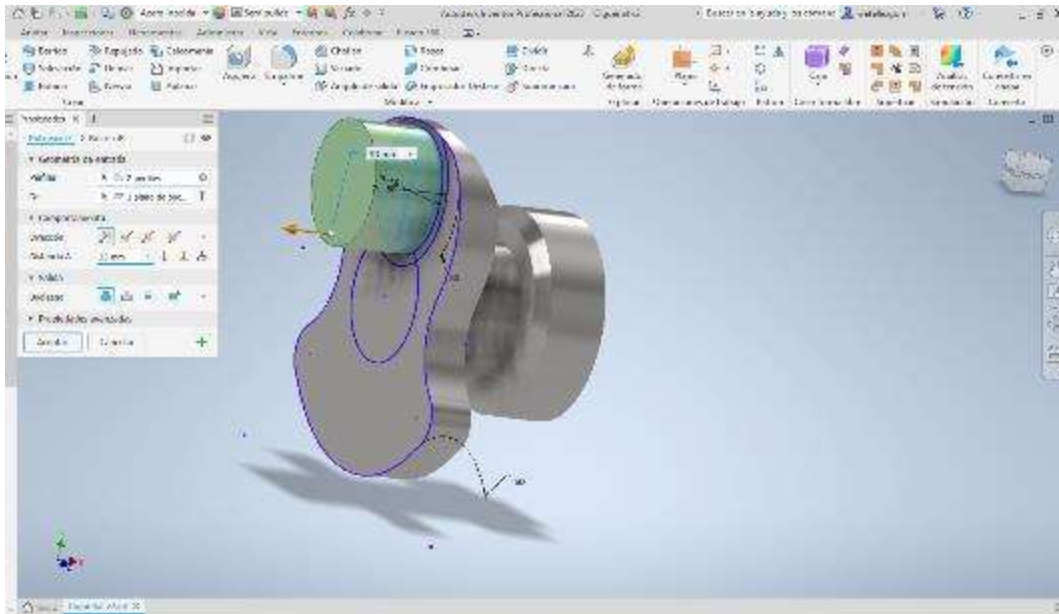
*Diseño de Base de Acoplamiento para Volante de Inercia.*



Continuando con el proceso se genera los muñones de biela los mismos que se encuentran con un desfase con respecto a los de bancada como se puede observar en la figura 24.

**Figura 24**

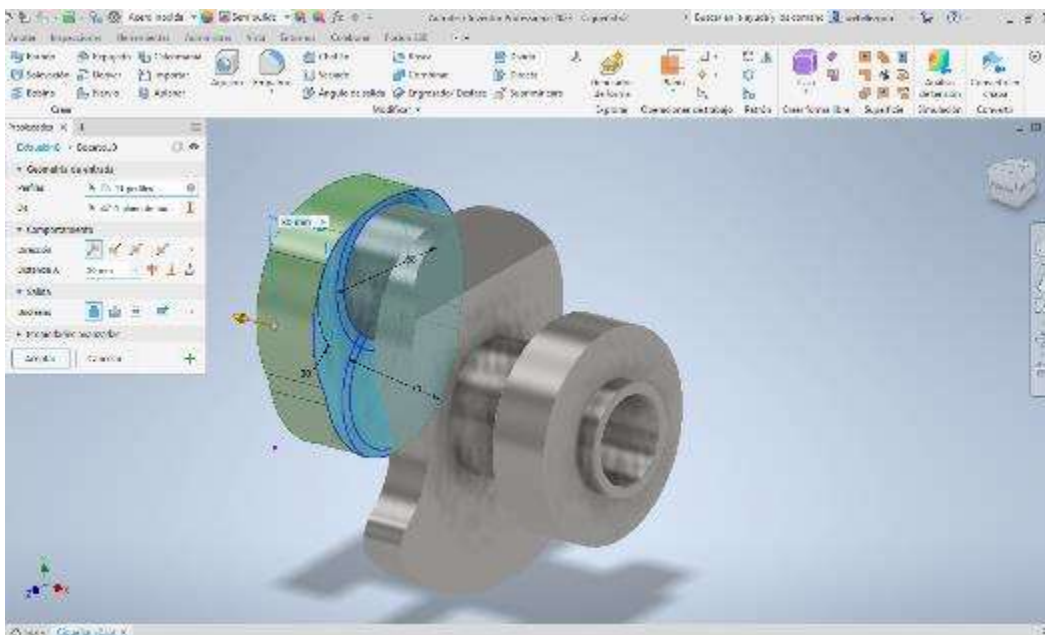
*Diseño de Muñón de Biela de Cigüeñal.*



Luego se procede a generar la geometría del contrapeso el mismo que conecta al muñón de biela como se puede apreciar en la figura 25.

**Figura 25**

*Diseño de Contrapeso Interior de Cigüeñal.*



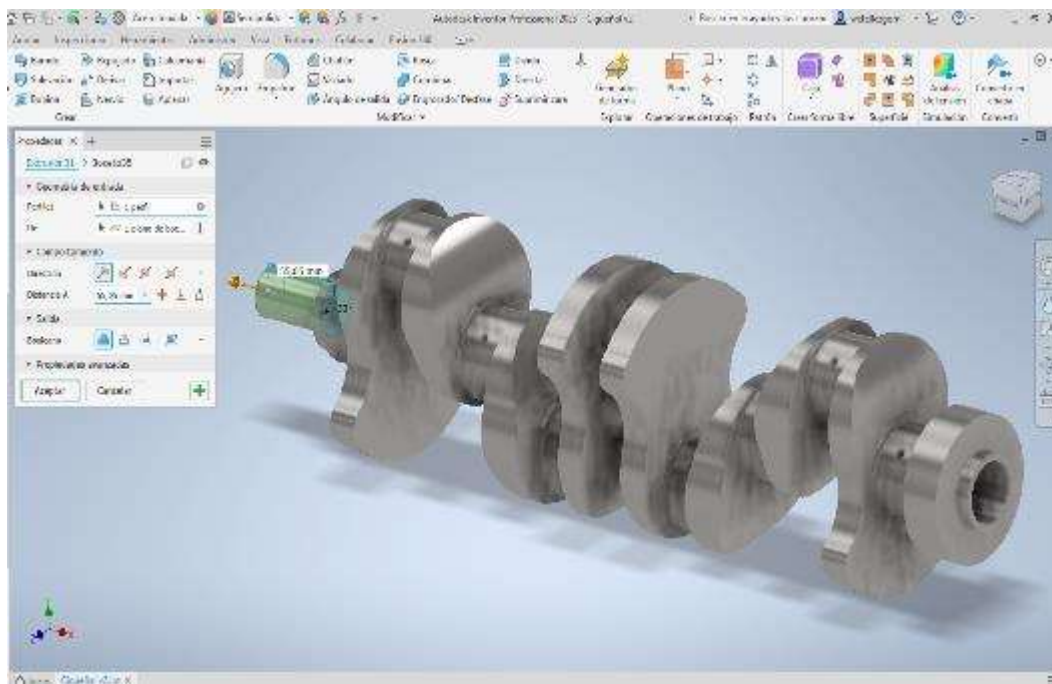


Continuamos con el proceso consecutivo de generación de los componentes del cigüeñal siguiendo la secuencia de diseño como lo son los muñones de bancada, contrapesos, muñón de biela, contrapeso y así sucesivamente hasta completar con el número con los que trabaja el cigüeñal, para luego proceder a generar el eje en el que va la porta chaveta, así como el piñón de cigüeñal y su respectivo perno de sujeción como claramente se puede observar en la figura 26.

Así mismo se debe considerar los detalles que se presentan durante el proceso de modelado como lo es los extremos y contornos de los contrapesos los mismos que poseen ciertos detalles de chaflan en sus extremos.

### Figura 26

*Diseño de Eje de Cigüeñal.*

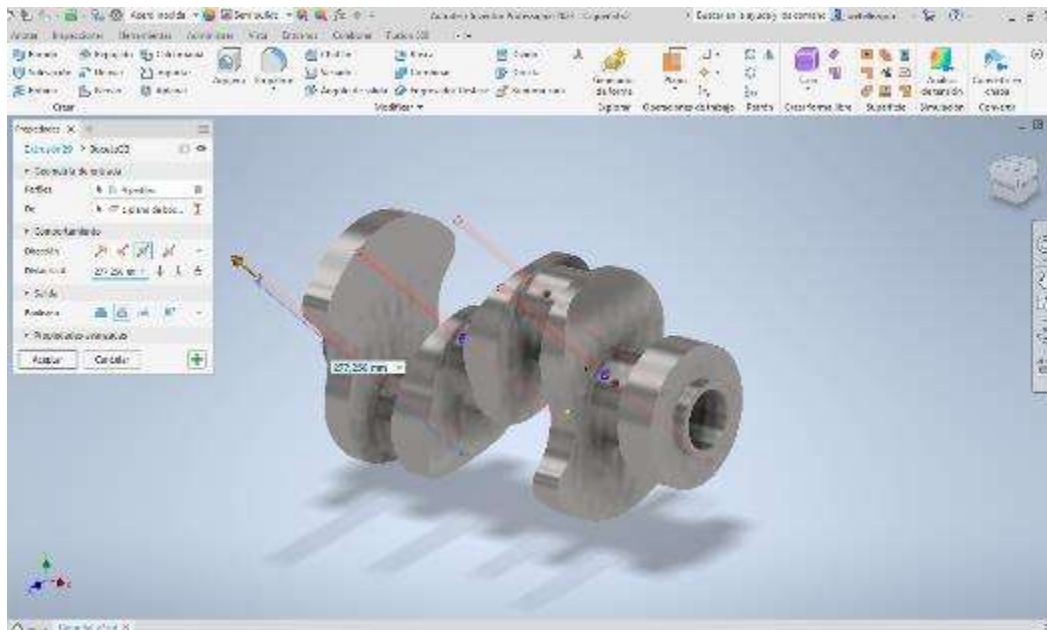


Uno de los detalles importantes es la creación de los orificios de lubricación del cigüeñal como se puede observar en la figura 27.

Se debe considerar que estos orificios se encuentran interconectados internamente en el cuerpo del cigüeñal y sus salidas se presentan en los centros de los muñones tanto de biela como en los de bancada.

**Figura 27**

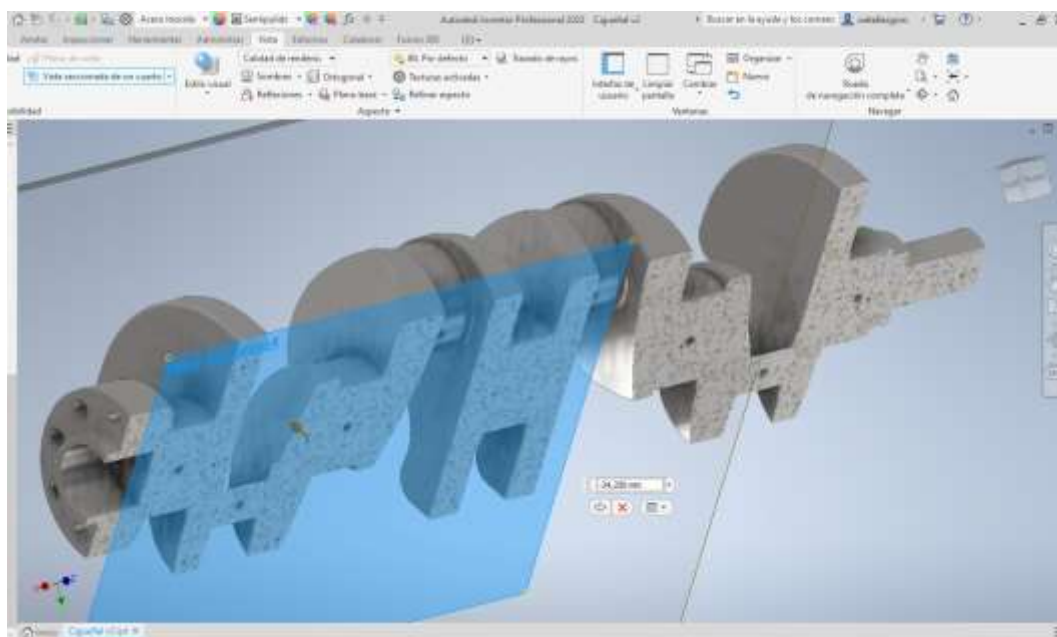
*Diseño de Orificios de Lubricación de Cigüeñal.*



La comprobación del sólido en su totalidad del cigüeñal modelado se lo puede observar en la figura 28, en la que a través de una sección de visualización se puede comprobar los detalles internos del diseño.

**Figura 28**

*Sección de Visualización de Modelado del Cigüeñal.*



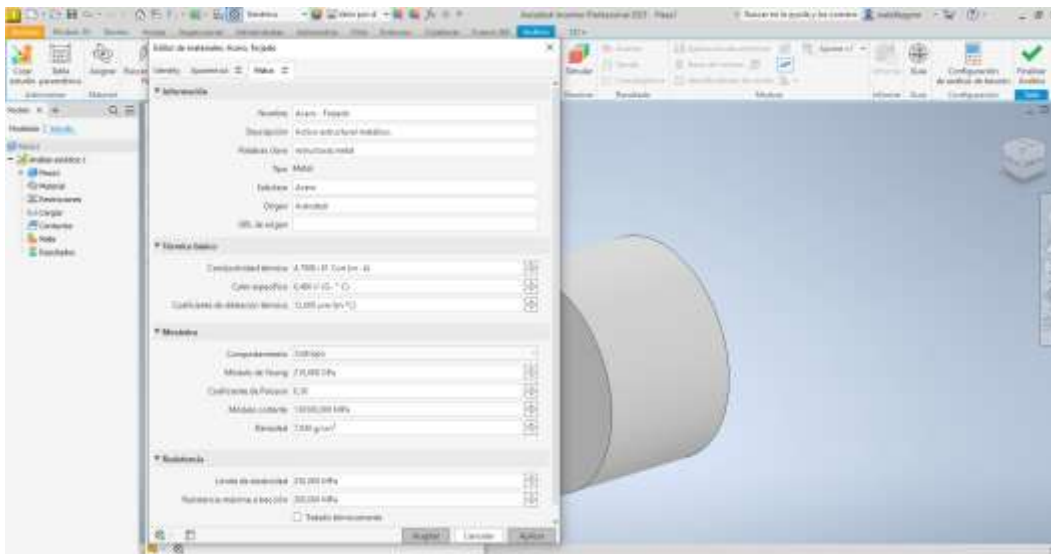
De esta manera se concluye la fase de modelado 3D del cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L a través del software Inventor.

### 3.3. Alimentación de Datos en Autodesk - Inventor

Luego de haber generado el modelado del cigüeñal se procede a determinar el material con el que está constituido el elemento para lo cual (Gómez, 2018) establece que “se fabrican de acero forjado”, de esta manera a través del software se establecen las propiedades mecánicas del material con las que está elaborado el cigüeñal, según (Cruz, 2015) determina que es “un material SAE 1548”, por lo que los datos registrados en el software se encuentran almacenados por defecto en el propio programa cada una de sus propiedades así como se puede observar en la figura 29.

**Figura 29**

*Propiedades de Material Acero Forjado en Software Inventor.*



Estos datos son muy importantes dependiendo del software que se designe para así lograr una solución óptima al problema planteado y desarrollado por la simulación del componente.

Una vez que se haya asignado el material al elemento a ser simulado se procede con la siguiente fase que es la generación del mallado.

### 3.4. Mallado de Cigüeñal

En este punto de la metodología se debe tomar muy en cuenta esta generación numérica del mallado ya que es un factor fundamental por el motivo que se trabaja básicamente con geometrías complejas en áreas del elemento a ser analizado, así como cuando los resultados del análisis son complejos, por los que esta generación de mallado se basa en algoritmos computacionales que logran crearlos, así como ayudar a lograr la solución al problema planteado.

Así mismo se tiene claro la conceptualización del proceso de mallado sobre un elemento a ser analizado y para este caso es el del cigüeñal ya que al momento de aplicarlo esto permite que el proceso de resolución se fundamenta en el tipo y refinamiento del elemento, logrando de esta manera un correcto resultado tanto en esfuerzo como en las deformaciones que presentará.

Autodesk Inventor es un software que permite realizar este proceso el mismo que define el tipo de elemento según la geometría del elemento a ser analizado, ajustando de esta manera el mallado según la forma no lineal y creando los respectivos nodos y los elementos requeridos para el proceso.

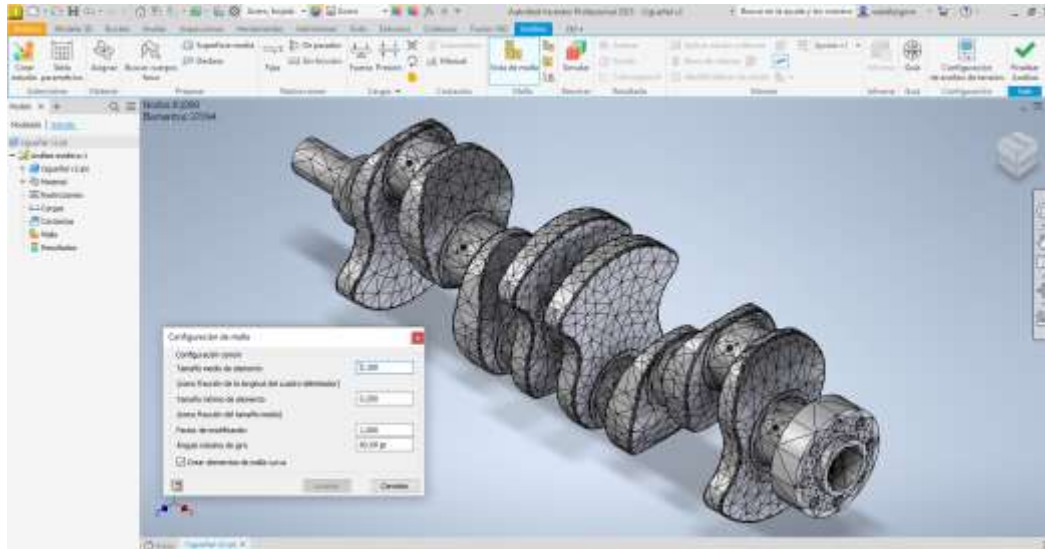
Otro aspecto a ser considerado por parte del software es el proceso de los cálculos con los que procesa los nodos y con los elementos al momento de realizar el respectivo análisis, pero en el menor tiempo posible lo que se traduce en una eficiencia del proceso al ser tomado en cuenta en la obtención de las soluciones.

También la consideración que se lleva a cabo es la definición de las zonas de concentración que en los resultados se concentren como esfuerzos sobre el cigüeñal para lo cual si se requiere se debería variar de la forma no lineal a que esta sea de mayor cantidad de nodos en el mallado y de elementos respectivamente, pero con la consideración que el proceso de solución puede consumir mayor tiempo en el proceso. Este proceso se puede observar en la

figura 30, en la que presenta ya la conformación del mallado sobre el elemento de estudio que en este caso es el cigüeñal.

### Figura 30

*Generación de Mallado en Software Inventor.*



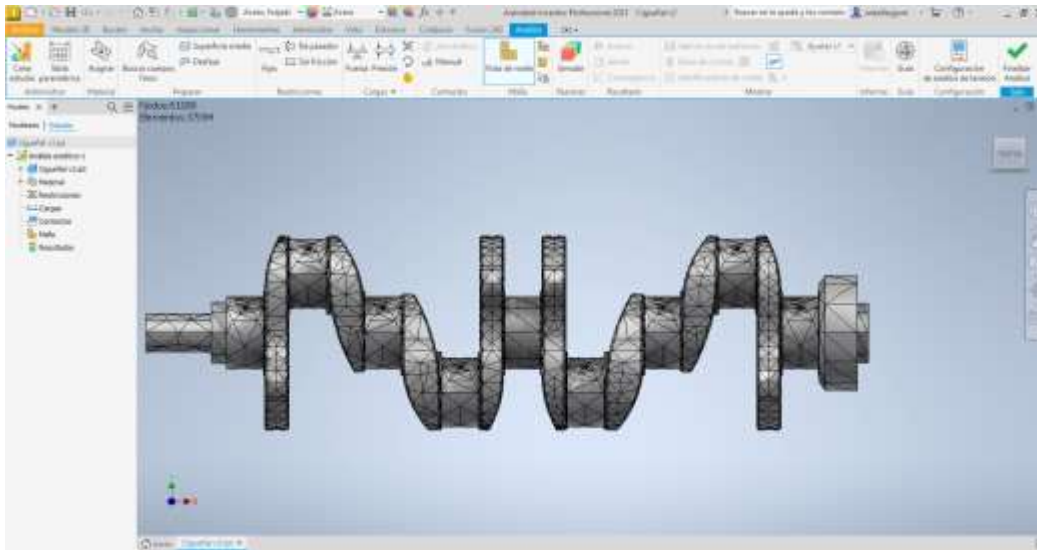
### 3.5. Condiciones de Frontera

En lo concerniente al estudio de elementos finitos el generar una condición de frontera es de mucha importancia para cualquier tipo de análisis sobre el elemento y sobre todo estas consideraciones permiten generar un límite a cualquier tipo de mecanismo que ingrese a un método de análisis ya que se permite dentro de un sistema establecer un determinado grado de libertad sobre el elemento, mecanismo o sistema para de esta manera lograr un desplazamiento ya sea de rotación o de traslación dependiendo solamente de la dirección a la que se encuentra aplicada la carga.

Este tipo de generación de condiciones de frontera a las que se encontrarán el cigüeñal antes de proceder con la simulación del elemento se puede observar en la figura 31 por medio de restricciones.

**Figura 31**

*Generación de Condiciones de Frontera en Software Inventor.*



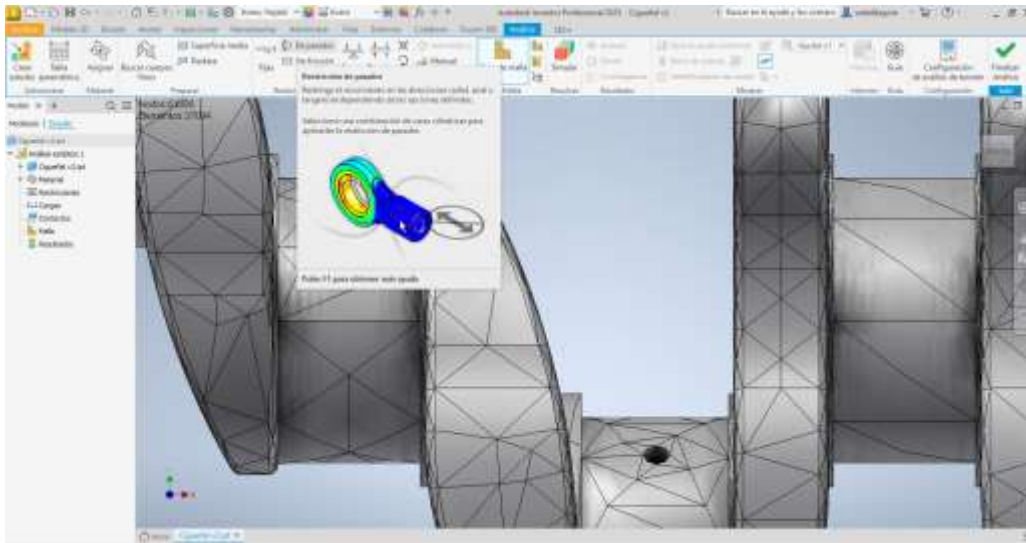
Para el caso del estudio estructural del cigüeñal del presente trabajo investigativo se ha considerado la generación o aplicación de condiciones de frontera en las áreas que conforman los muñones de bancada que es donde se soporta la estructura del cigüeñal sobre bloque de cilindros a través restricciones de fijación de movimiento de traslación según sus ejes de coordenadas, también esta restricción se aplica al movimiento de rotación sobre los ejes correspondiente a su desempeño y dejando libre el eje de coordenadas sobre el que se realiza la rotación del cigüeñal y de esta manera logrando trabajar sobre un solo grado de libertad como se puede observar en la figura 32.

Esto se fundamenta bajo el criterio propio que dentro de proceso del análisis estructural de elementos finitos se procede a proporcionar los límites referentes a los modelos de manera física y a estos se les asigna un determinado valor de manera inicial al cual va a proceder con el proceso idóneo en las primeras fases de la resolución de ecuaciones diferenciales que son determinados.



**Figura 32**

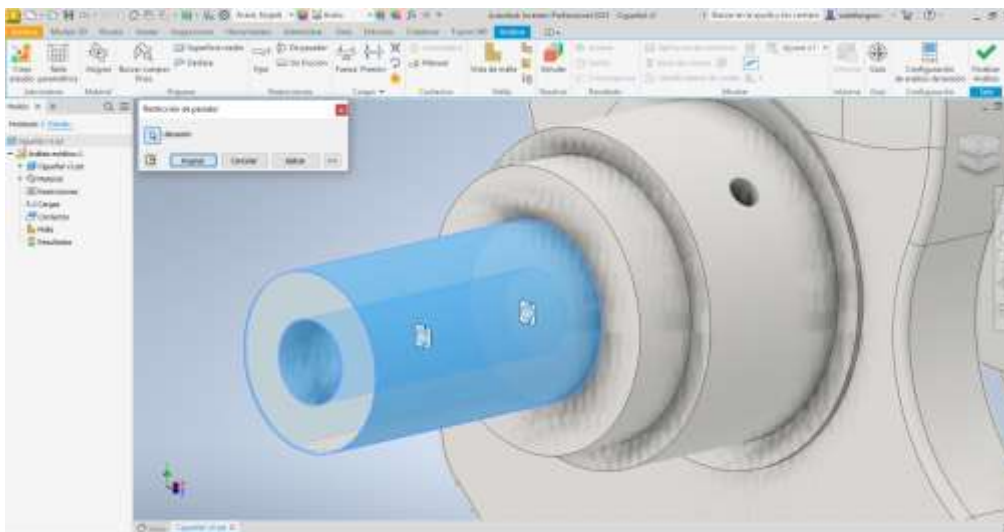
*Aplicación de Condiciones de Frontera en Software Inventor.*



Así mismo otra condición de restricción que se aplica sobre el cigüeñal lo es en los extremos de manera fija por el motivo que en estas áreas se generan las entregas o salidas de energía o conocidas como torque de salida de motor. Pero de esta manera se debe considerar que se genera una fuerza de reacción como lo es la generada por el sistema de transmisión, de manera normal, pero con la condición que este puede variar si se aplican cargas a la estructura del vehículo, como se observa en la figura 33.

**Figura 33**

*Aplicación de Restricciones Fijas.*

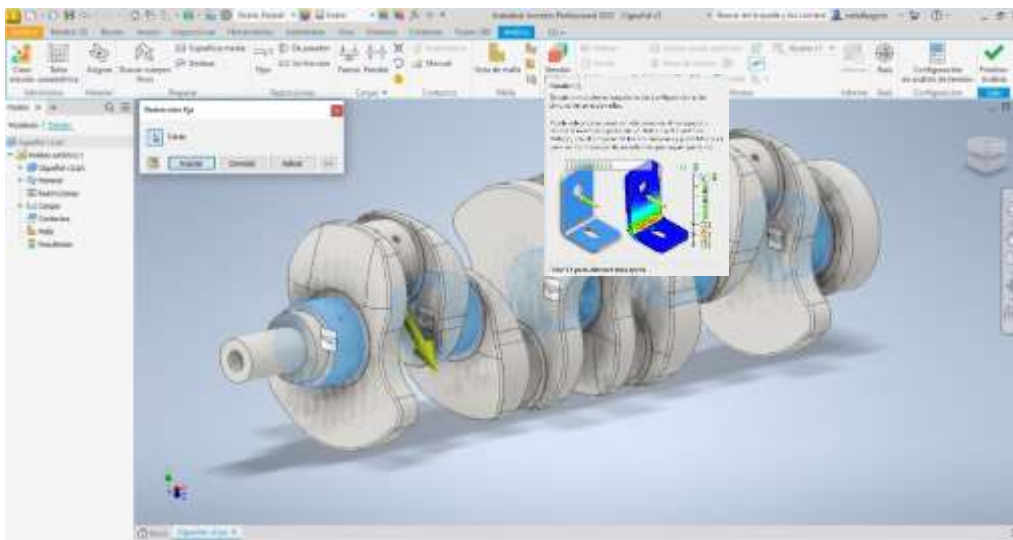


### 3.6. Análisis Estructural

En lo concerniente al análisis estructural del presente proyecto investigativo sobre la falla presentada en el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L, se utilizan modelos matemáticos referente a resistencia de materiales y de esta manera poder encontrar las deformaciones que se generan al momento de su funcionamiento, esfuerzos internos, así como las tensiones que están actuando sobre su estructura resistente del elemento en análisis, dentro del software se aplican dichas cargas en la sección de simulación como se puede observar en la figura 34.

#### Figura 34

*Inicio de Simulación de Cargas.*



Cada una de estas cargas se ven expresadas de la siguiente manera:

#### 3.6.1. Cargas Estáticas

En la determinación de este tipo de cargas se procede a aplicar de manera directa sobre cada uno de los muñones de biela por el motivo que en cada una de estas secciones las fuerzas que se encuentran aplicadas serán descompuestas según su movimiento con el objeto de poder determinar los siguientes factores:

- Esfuerzo máximo de Von Mises
- Deformaciones
- Factor de seguridad



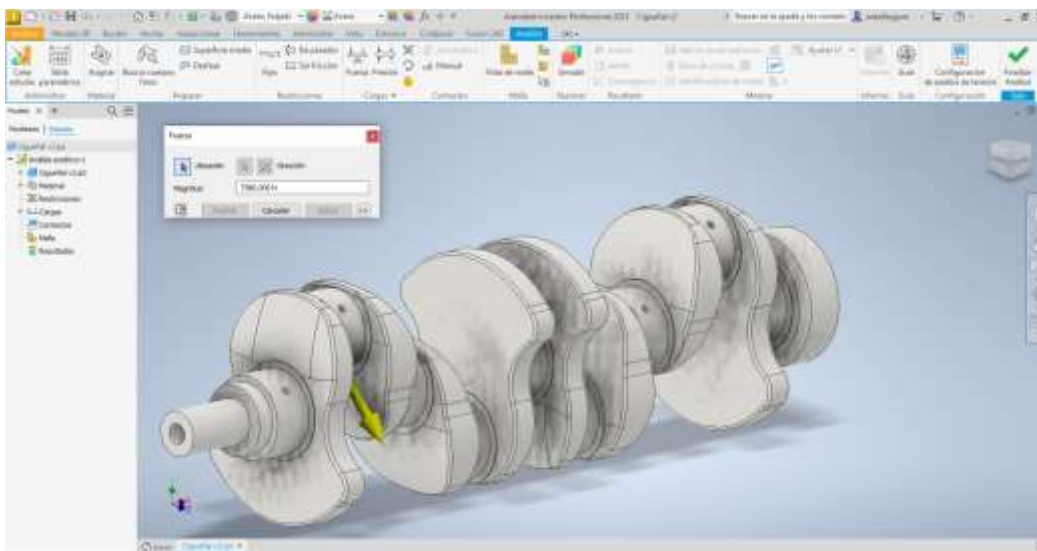
El cálculo de las fuerzas máximas a la que se encuentra sometido las distintas áreas del cigüeñal que para el presente caso son los muñones se viene a determinar a través de la curva presión generada por la combustión y el recorrido o ángulo de desplazamiento del conjunto biela manivela en la trayectoria circular del cigüeñal, tomando en cuenta que la variación del régimen del giro por velocidad que alcanza el elemento y de esto depende la máxima presión que se genera dentro de la cámara de combustión.

Para la obtención de la fuerza máximo que produce el motor dentro de su fase de trabajo, solo se procede a realizar un cálculo sencillo que es el de dividir la presión máxima producida por la cámara de combustión con el área de la corona del pistón para de esta manera poder conocer los esfuerzos, pero teniendo en cuenta los distintos rangos de revoluciones de operación a los que actúa el componente que en este caso es el cigüeñal.

Según (Cruz, 2015) determina las siguientes condiciones de esfuerzo máximo son de  $F_y = -63120 \text{ N}$  y  $F_x = 7380 \text{ N}$ , a un ángulo de giro del cigüeñal de  $5^\circ$ , esta aplicación sobre el cigüeñal se aprecia en la figura 35.

### Figura 35

*Aplicación de Cargas.*



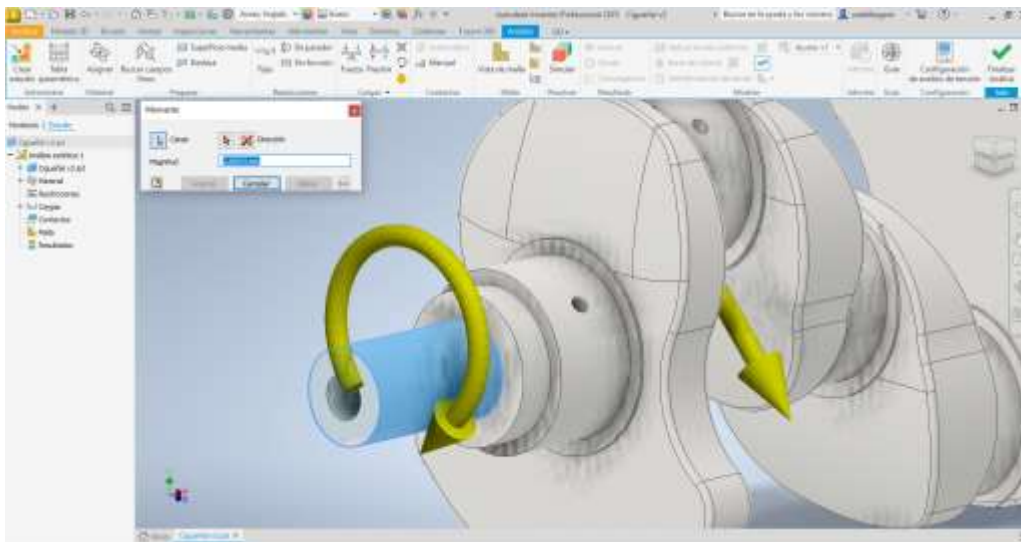
### 3.6.2. Carga Dinámica

Para el caso de la determinación de los esfuerzos dinámicos al momento del funcionamiento del cigüeñal como se observa en la figura 36, se procede a la aplicación del principio de Goodman.

Claro está que se debe tener en cuenta que para proceder a realizar este tipo de análisis con un tipo de carga no proporcional se crea una carpeta con todos los cálculos obtenidos del estudio estático del cigüeñal, de tal manera que la variación del tiempo es proporcional a la variación del ángulo de giro del cigüeñal, pero con la toma en cuenta del orden de encendido que posee ese tipo de motor que para el caso de estudio es el orden de 1, 3, 4, 2.

#### Figura 36

*Aplicación de Cargas Dinámicas.*

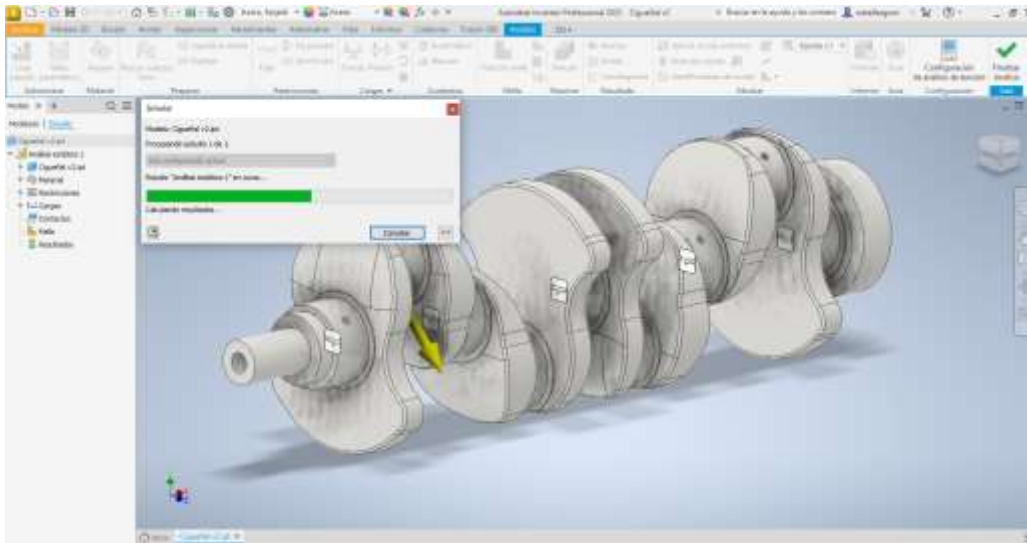


Para este tipo de aplicación de cargas se debe tener en cuenta la dirección a la que estas actúan sobre la superficie del elemento para lo cual el software tiene la opción de cambiarle de acuerdo al criterio del diseñador.

Dentro de las cargas el software brinda dos tipos como son cargas por fuerzas y presiones, para luego de aplicarlas proceder a ejecutar la simulación total por parte del programa como se muestra en la figura 37.

**Figura 37**

*Ejecución de Simulación del Análisis.*

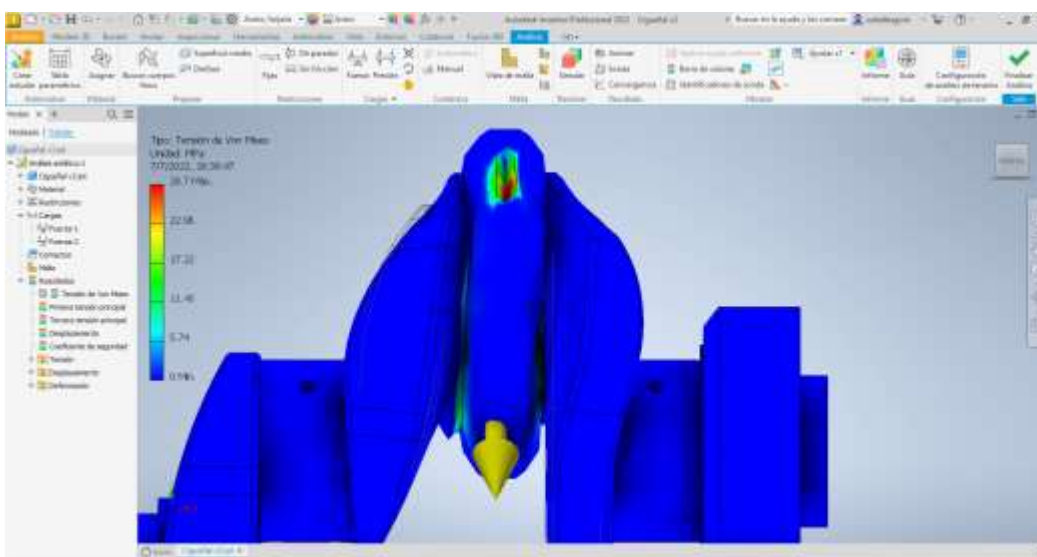


### 3.7. Obtención de Resultados

Una vez que se termine el proceso de cálculo por parte del software este genera directamente los resultados del comportamiento del elemento bajo las restricciones, cargas y características del elemento como se puede observar en la figura 38, la misma que gráficamente y a través de un rango numérico y de colores permite observar la concentración de los esfuerzos estructurales que se dan sobre el elemento que para este caso es el del cigüeñal, para posteriormente realizar el análisis de los resultados obtenidos.

**Figura 38**

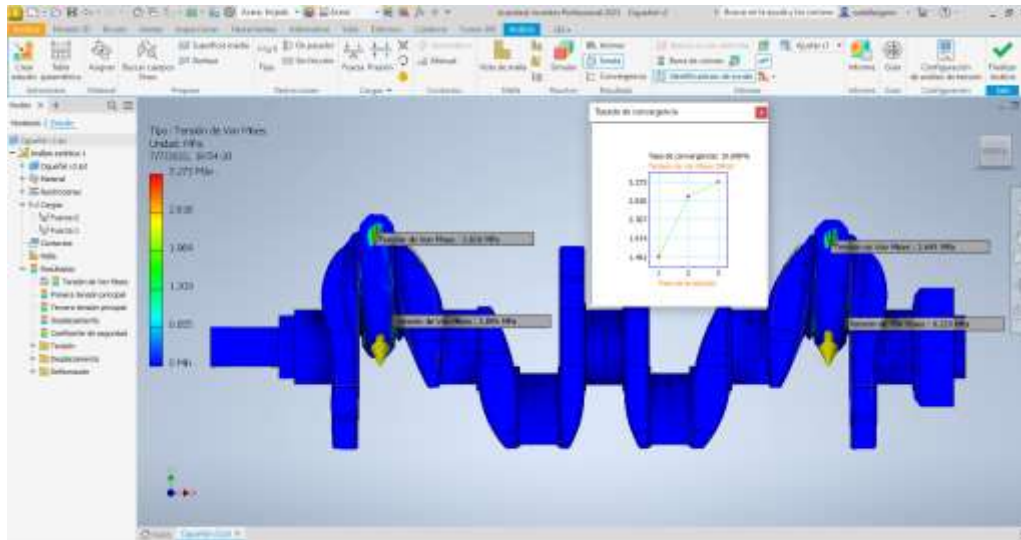
*Resultado de Simulación.*



De manera general también se puede observar las áreas críticas a través de una herramienta de visualización denominada sonda y su gráfico de comportamiento a través de otra herramienta de visualización denominada convergencia de resultados como se observa en la figura 39.

**Figura 39**

*Resultado de Puntos Críticos y Gráfico de Convergencia.*



## Capítulo IV

### Análisis de Resultados

#### 4.1. Análisis Transitorio

Los resultados que se obtuvieron luego de la simulación respectiva sobre el modelado el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L por parte del software Inventor de Autodesk, fueron los siguientes:

Se realizó un análisis del modo estático el mismo que cuenta con sus propiedades físicas como:

- Material del elemento es el acero forjado
- Densidad de 7,85 g/cm<sup>3</sup>
- Masa de 24,55 kg
- Área de 323592 mm<sup>2</sup>
- Volumen de 3127880 mm<sup>3</sup>
- Centro de gravedad en x de -205,84 mm, en y de -0,3190 mm y en z de 0,0011

mm

En el caso de la configuración del mallado del elemento se generó con un tamaño medio del elemento de 0,1, el tamaño mínimo del elemento de 0,2, con un factor de modificación de 1,5, el ángulo máximo de giro de 60° y una generación automática de creación de la malle en partes curvas del elemento.

Las características que presenta el material que se aplicó al modelado y simulación cuanta con las siguientes características:

- Denominación del material es el acero, forjado
- Densidad de masa de 7,85 g/cm<sup>3</sup>
- Resistencia máxima a la tracción de 300 MPa
- Módulo de Yung de 210 MPa

- Coeficiente de Poisson de 0,3 su
- Módulo cortante de 80,76 GPa

Estos datos son parte fundamental en el análisis transitorio que proporciona al estudio inicial por el motivo que brinda características fundamentales del elemento.

El estudio estructural del elemento transitorio genera de manera progresiva la secuencia del historial del proceso o desarrollo del análisis el mismo que permite evaluar las respuestas a las deformaciones en determinadas áreas cuando los efectos se convierten en significativos.

#### 4.2. Análisis de Carga Estática

Luego de haber establecido las distintas condiciones de frontera para la simulación el software generó los siguientes resultados aplicados al cigüeñal con la carga máxima del cilindro que conecta al muñón número uno del muñón de biela del elemento y estos se pueden apreciar en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Resultados Principales Obtenidos por Simulación*

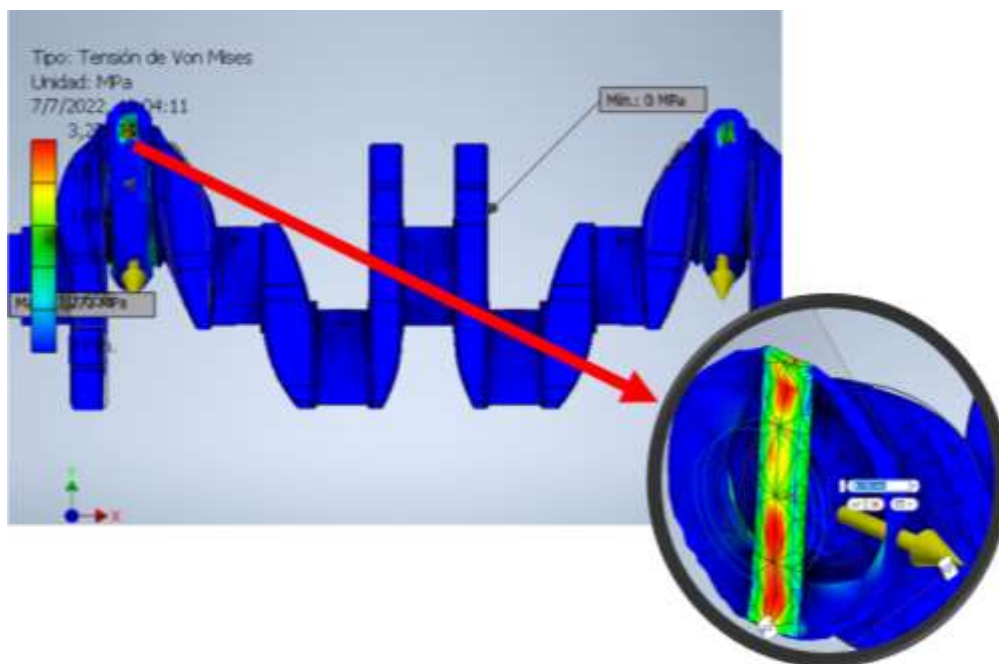
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen		3127890 mm <sup>3</sup>
Masa		24554 kg
Tensión de Von Mises	0,000000185 MPa	3,27 MPa
Primera tensión principal	-0,651 MPa	4,09 MPa
Tercera tensión principal	-3,238 MPa	1,15 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000134 mm
Coeficiente de seguridad	15 su	15 su

Para el resto de los resultados referente a desplazamientos estos se pueden observar en el Apéndice I en el que consta el informe completo de la simulación del cigüeñal del estudio por parte del software Inventor.

Como primer resultado que arroja el proceso de simulación es el esfuerzo de Von Mises el mismo que presenta una magnitud proporcional de energía de distorsión en el sector del vértice superior del muñón, así como en el orificio de lubricación central con un valor máximo de 3,27 MPa como se puede observar en la figura 40, siendo justamente la sección donde el cigüeñal en estudio presentó su fallo estructural que ocasionó su rotura.

#### Figura 40

*Resultado de Tensión de Von Mises.*

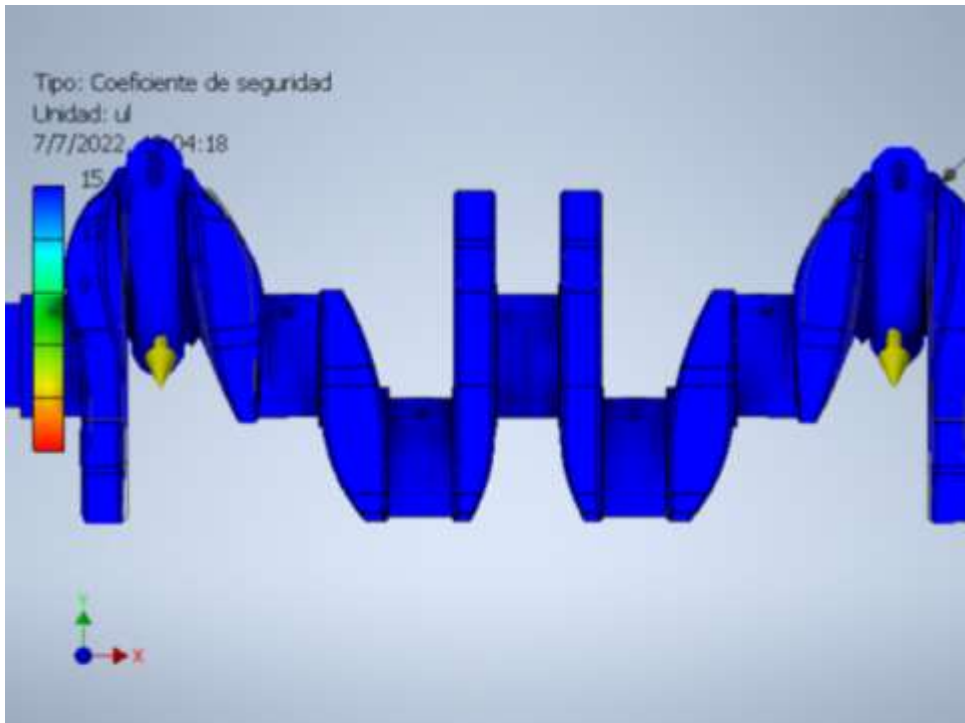


Esta concentración de esfuerzo máximo que se provoca en esta sección del muñón de biela el software procede a calcular el mínimo y máximo factor de seguridad en comparación a las otras áreas del elemento en el que se arrojó un valor de 15 su el mismo que se encuentra en el rango permisible ya que según lo establecido por factor de diseño este debe ser mayor a 5 su.

Este comportamiento y resultado que generó el software se puede observar en la figura 41.

**Figura 41**

*Resultado de Coeficiente de Seguridad.*



#### **4.3. Análisis de Resultados Obtenidos**

Con la obtención de todos los resultados obtenidos a través de este estudio tanto de manera cualitativa por parte de las gráficas, así como de la parte cualitativa con los valores máximos y mínimos estos permiten analizar cada uno de los comportamientos estructurales del cigüeñal bajo las condiciones de frontera preestablecidas en el proceso de modelado y simulación por parte del software Inventor de Autodesk.

El conjunto de resultados obtenidos posee mucha importancia ya que se puede determinar cada uno de los esfuerzos y deformaciones que generan cada una de las cargas y condiciones sobre el cigüeñal del motor Isuzu D-Max 2.5 L cuando se produce la explosión dentro de la cámara de combustión y estos esfuerzos se transmiten a través del pistón, bulón, biela y cojinetes, hasta llegar al muñón del cigüeñal y un muy corto tiempo dependiendo el régimen generado dentro de su funcionamiento.

Por lo que dentro de este comportamiento se puede observar que las mayores cargas y esfuerzos se producen en los límites laterales de los muñones de biela y las paredes laterales,



así como una fuerte concentración de carga en los orificios de lubricación provocando de esta manera que estas secciones sean críticas en el caso de una falla estructural que es lo que se aproxima sin duda alguna a la que produjo la falla en el caso de estudio del cigüeñal analizado para este proyecto.

## Conclusiones

Por medio del presente proyecto investigativo referente al análisis estructural de un cigüeñal de un motor Isuzu D-Max 2.5 L, se estableció los parámetros que se involucran sobre este tipo de elemento cuando se encuentra en funcionamiento, pero tomando en cuenta cada una de sus características, así como sus especificaciones técnicas, entre estos parámetros constan las cargas a las que se encuentra sometido, el material con el que se encuentra constituido siendo para este tipo de cigüeñal el acero forjado, en lo concerniente a dimensiones estas se obtuvieron directamente del elemento en estudio y comparado con las especificaciones del elemento.

Posteriormente se determinó el uso del software de Autodesk Inventor, el mismo que brinda cada una de las características para que se lleve a cabo este estudio de cado desde el modelado en 2D, 3D y culminando con la simulación estructural de tensión, conjuntamente se permite complementar con la generación del informe total del caso de estudio del cigüeñal. Entre los resultados de mayor importancia se encuentran los siguientes: Tensión de Von Mises su valor máximo es de 3,27 MPa, desplazamiento de la superficie del componente de 0,000134 mm y un coeficiente de seguridad de 15su.

Conjuntamente con los resultados principales y secundarios se validó cada uno de estos llegando a la conclusión que para se presente caso de estudio y observando su rotura, con la ayuda del software se observa que claramente en la zona de la falla se concentra la mayor tensión que es el los límites del muñón de biela con las paredes laterales así como se presenta una fuerte concentración en los conductos de lubricación por lo que se llega a la conclusión definitiva y de manera contundente que la falla se produjo en los sectores que mayor influencia repercuten la concentración de cargas.

## Recomendaciones

Lo importante para este tipo de estudios de caso es tener toda la información e historial del elemento, así como las especificaciones técnicas, lo que esto brinda es facilidad en el manejo de información para alimentar al software para que este realiza un proceso correcto y lo más apegado a la realidad, logrando de esta manera resultados óptimos.

Así mismo el seleccionar el correcto tipo de mallado con el que se realiza el proceso de cálculo del elemento, sobre todo por las secciones que presentan formas irregulares.

Una recomendación de suma importancia luego de obtener los resultados por parte del software es que para el presente caso de estudio la mayor concentración de carga se da a los extremos del muñón de biela, llegando a determinar que los cigüeñales las concentraciones puntuales se direccionan a estos vértices así como sobre los orificios de lubricación, para el caso de los vértices del muñón se recomienda comprobar de manera directa el radio de curvatura del empalme ya que si este se sigue reduciendo lo más probable es que se produzca un debilitamiento estructural hasta llegar a la rotura definitiva. Para contrarrestar esta anomalía la recomendación será la de generar mayor radio de curvatura del empalme y esto se da únicamente con una buena calibración preparación de la piedra abrasiva utilizada al momento del rectificado del cigüeñal.

## Bibliografía

- Aron, S. (5 de Mayo de 2019). *Dassault Systemes*. Obtenido de <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/tag/analisis-estructural/>
- Bilbao, A., Aguirrebeitia, C., Martínez, C., & Heras, M. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática*. Madrid: Paraninfo.
- Cruz, V. (2015). *Análisis de falla del cigüeñal de un motor MWM-ACTEON 4.12 TCE*. Pachuca: SEP.
- Gómez, S. (2018). *Análisis tensional de un cigüeñal de un motor de combustión interna alternativo mediante elementos finitos*. Cantabria: UniCan.
- González, D. (2018). *Motores 2da Edición*. Madrid: Paraninfo.
- Reyes, A. (2014). Validación de modelos hidrodinámicos de tres modelos topológicos de lagunas facultativas secundarias. *SciELO*, 637-654.
- Ríos, N., Valdés, J., Pineda, H., Daza, M., Pinilla, A., Becerra, D., . . . Sierra, A. (2020). *Introducción a la dinámica computacional de fluidos en Ingeniería Química*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Erazo, W. G., Quiroz, J. L., Salazar, B. J., Pallo, A. D., Quiroz Erazo, L. A., & Zambrano Leon, V. D. (2017). Modelación del parámetro de identificación de diagnóstico PID's, del sensor de temperatura de refrigerante del motor ECT del sistema de control de inyección electrónica de combustible EFI, mediante regresión no lineal. *INNOVA Research Journal*, 2(12), 112-122. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n12.2017.308>
- Fryśkowski, B. (2017). Electric field distribution in spark plugs insulators – modeling and computer simulation. *Diagnostyka*, 18(1), 87-93.

Puebla, E. G. V., Neira, D. J. M., Pinargote, A. J. P., & Vargas, A. R. R. (2019, July).

Ergonomía para pilotos de monoplaça. In Biblioteca Colloquium.

## Anexos

### Anexo 1: Informe de Obtención de Resultados de Análisis Estructural de Cigüeñal a través de Software Inventor

#### Informe de análisis de tensión cigüeñal D-Max 2.5L



Archivo analizado:	Cigüeñal v2.ipt
Versión de Autodesk Inventor:	2023 (Build 270158000, 158)
Fecha de creación:	7/7/2022, 19:04
Autor del estudio:	Moreno Carrión Jean Pierre
Resumen:	

#### Análisis estático:1

##### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	7/7/2022, 18:50
Estado de modelo	[Principal]
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No

#### Propiedades

#### Resumen

Autor	Escritorio
-------	------------

#### Proyecto

Nº de pieza	Cigüeñal v2
Diseñador	Escritorio
Coste	\$0,00
Fecha de creación	27/4/2022

#### Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

#### Propiedades físicas

Material	Acero, forjado
Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>
Masa	24,5538 kg

Área	323592 mm <sup>2</sup>
Volumen	3127880 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=-205,842 mm y=-0,319048 mm z=0,0011143 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

#### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0,1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0,2
Factor de modificación	1,5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	Sí

#### Material(es)

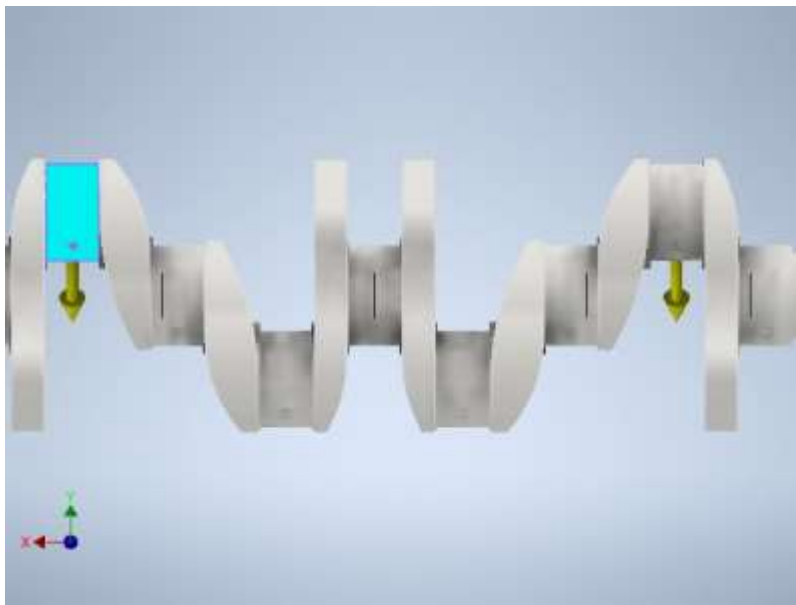
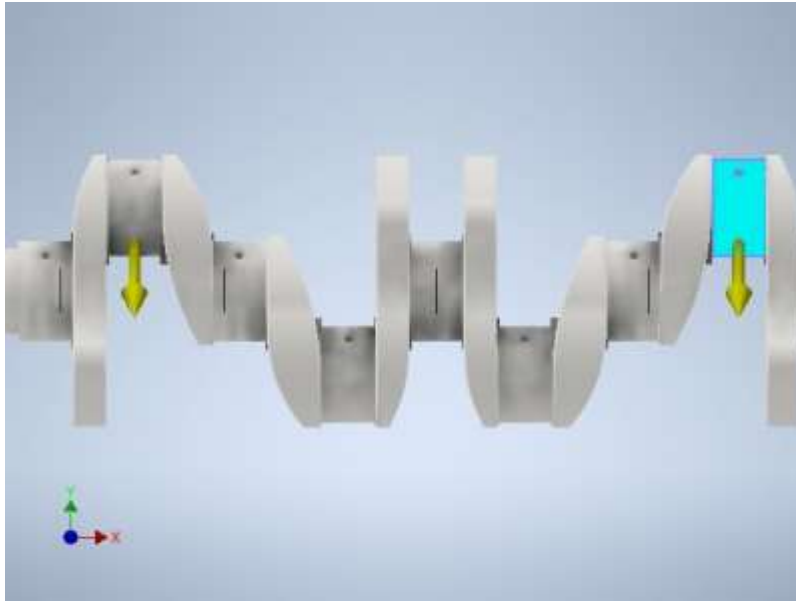
Nombre	Acero, forjado	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	250 MPa
	Resistencia máxima a tracción	300 MPa
Tensión	Módulo de Young	210 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,3 su
	Módulo cortante	80,7692 GPa
Nombre(s) de pieza	Cigueñal v2.ipt	

#### Condiciones de funcionamiento

#### Fuerza:2

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	6312,000 N
Vector X	- 6312,000 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N

**Cara(s) seleccionada(s)**

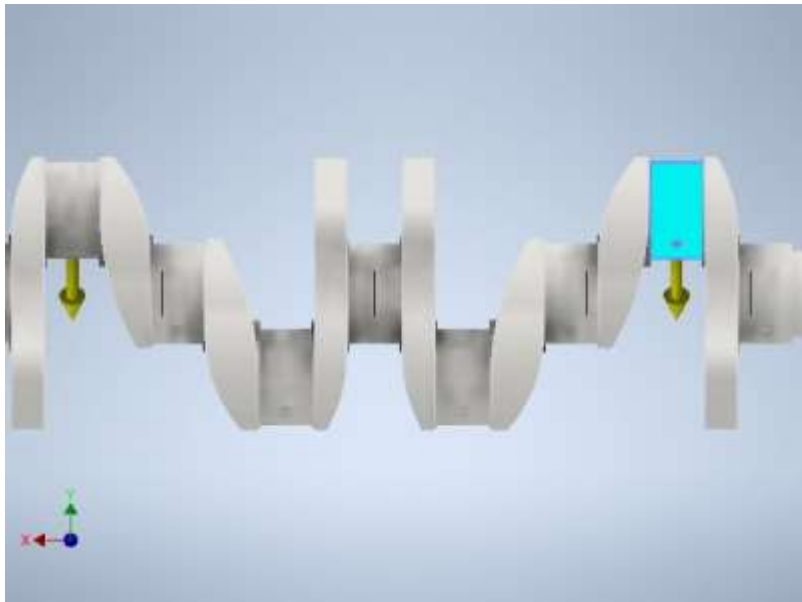
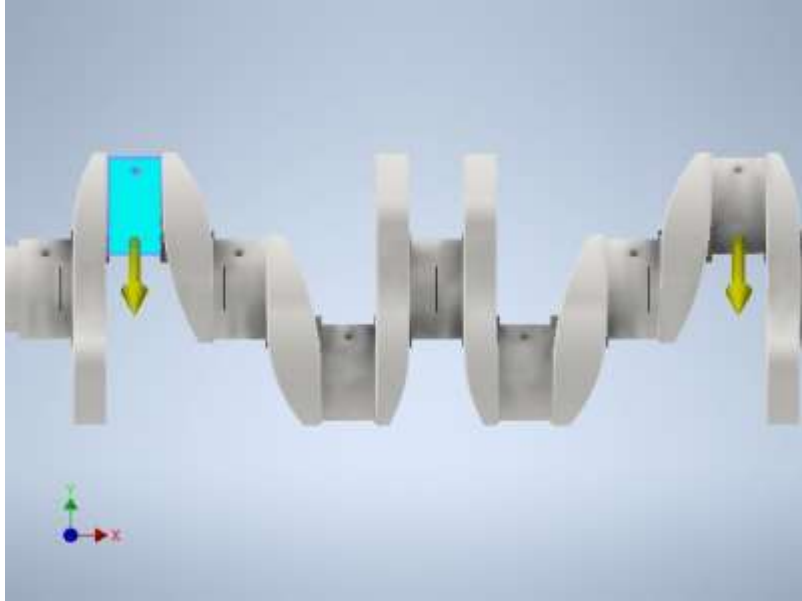


**Fuerza:1**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	7380,000 N
Vector X	-7380,000 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	0,000 N

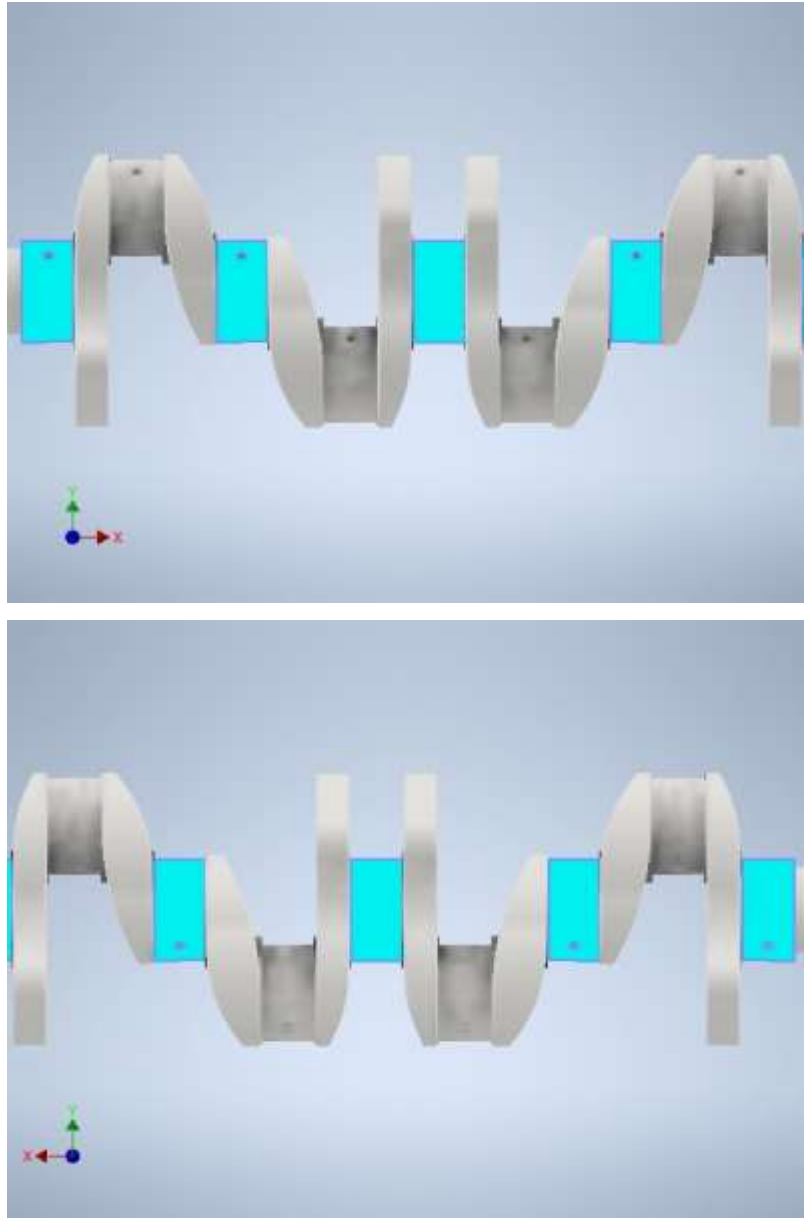
**Cara(s) seleccionada(s)**





Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción
Cara(s) seleccionada(s)	fija



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	13,0369 N	75 N      12,42	0,798895 N m	0,138817 N m

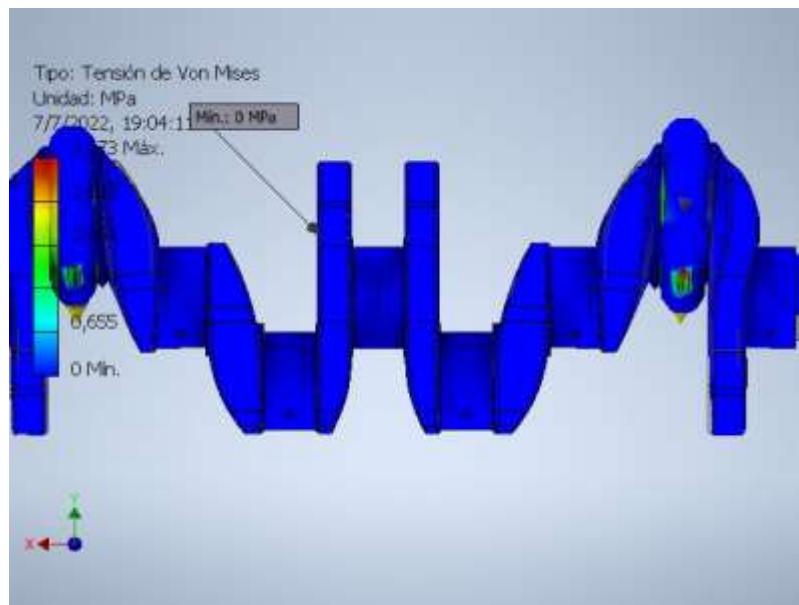
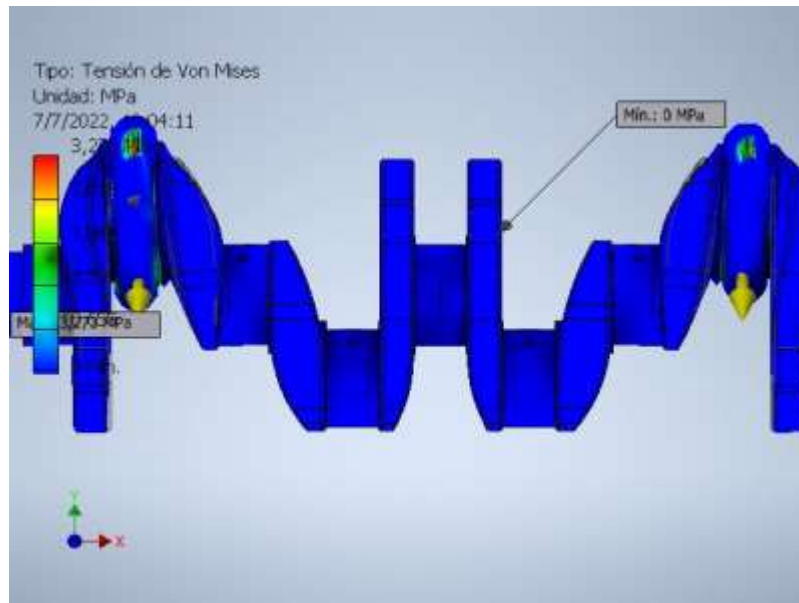
	2,785	0
53 N		N m
2,7854 N	-	0,786742 N m

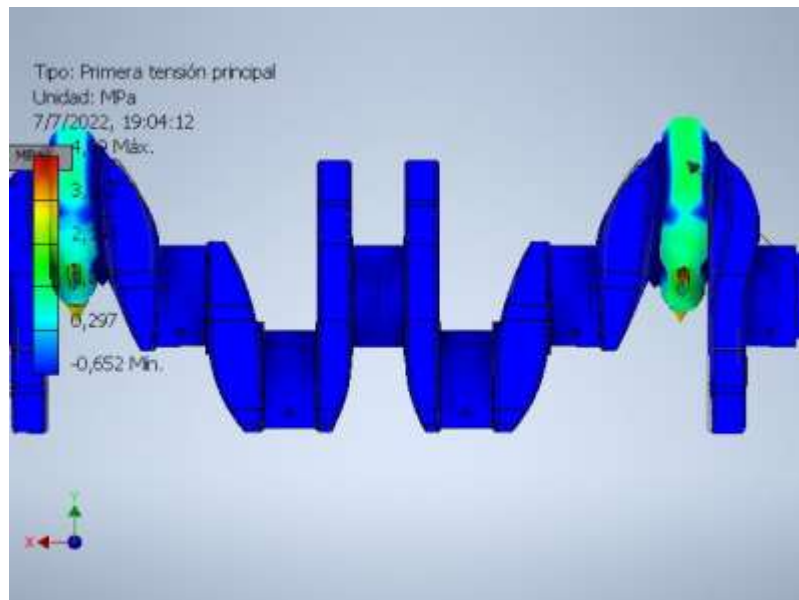
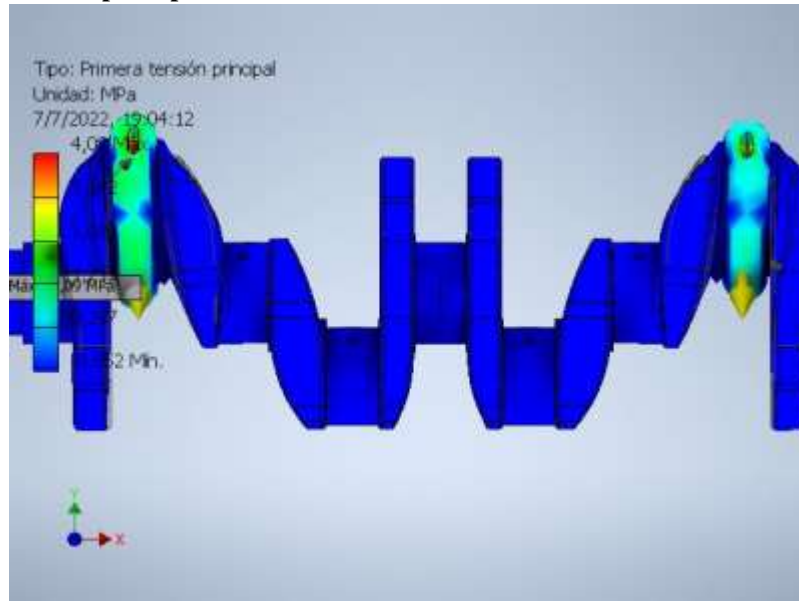
## Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	3127890 mm <sup>3</sup>	
Masa	24,554 kg	
Tensión de Von Mises	0,000000185147 MPa	3,27293 MPa
Primera tensión principal	-0,651547 MPa	4,0901 MPa
Tercera tensión principal	-3,238 MPa	1,14941 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,000133672 mm
Coficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-2,22434 MPa	2,24295 MPa
Tensión XY	-1,0658 MPa	0,886963 MPa
Tensión XZ	-0,687546 MPa	0,823093 MPa
Tensión YY	-2,04216 MPa	3,10187 MPa
Tensión YZ	-1,07366 MPa	0,686858 MPa
Tensión ZZ	-1,70524 MPa	3,05076 MPa
Desplazamiento X	-0,0000780269 mm	0,000069295 mm
Desplazamiento Y	-0,000124654 mm	0,000118624 mm
Desplazamiento Z	-0,000126424 mm	0,000125513 mm
Deformación equivalente	0,00000000000088 808 su	0,000014659 1 su
Primera deformación principal	0,00000000000037 2476 su	0,000016080 9 su
Tercera deformación principal	-0,000013522 su	0,000000668 764 su
Deformación XX	-0,0000108318 su	0,000007219 08 su
Deformación XY	-0,00000659779 su	0,000005490 73 su
Deformación XZ	-0,00000425624 su	0,000005095 33 su
Deformación YY	-0,00000868588 su	0,000010140 2 su
Deformación YZ	-0,00000664647 su	0,000004251 98 su
Deformación ZZ	-0,00000664577 su	0,000009823 81 su

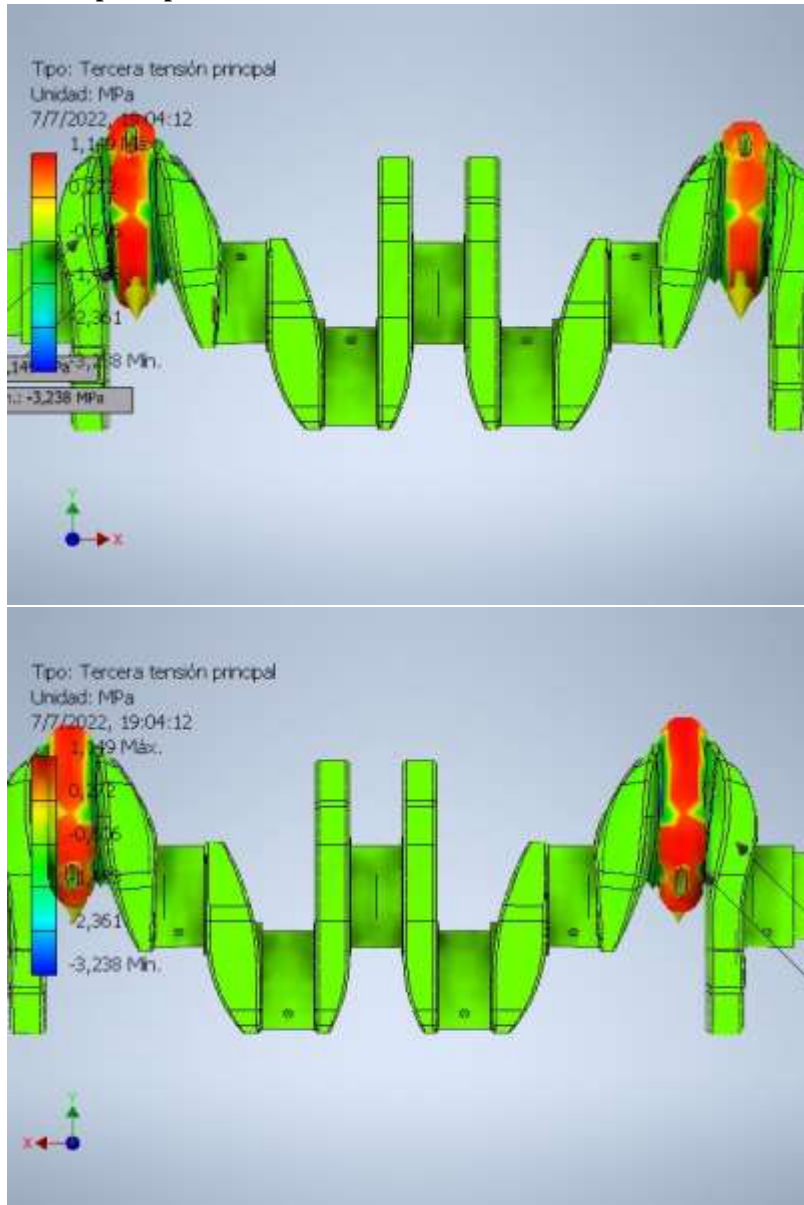
## Figuras

## Tensión de Von Mises

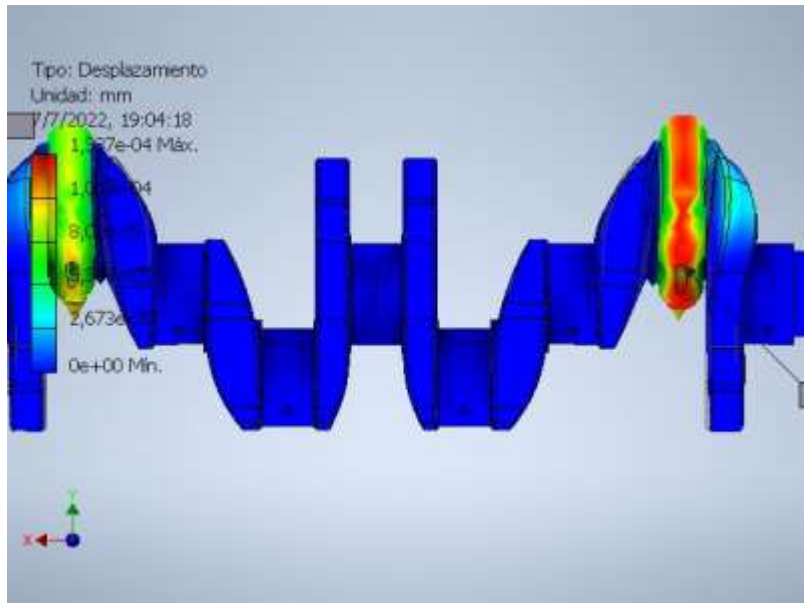
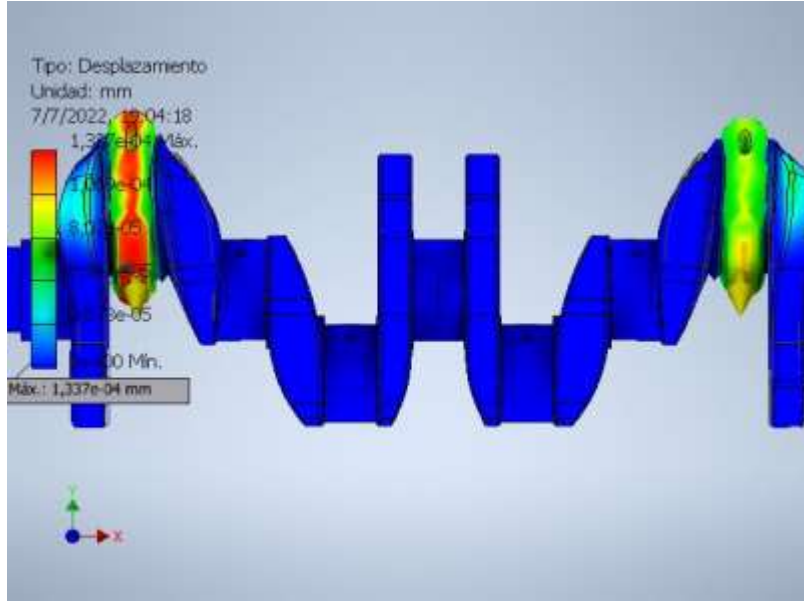


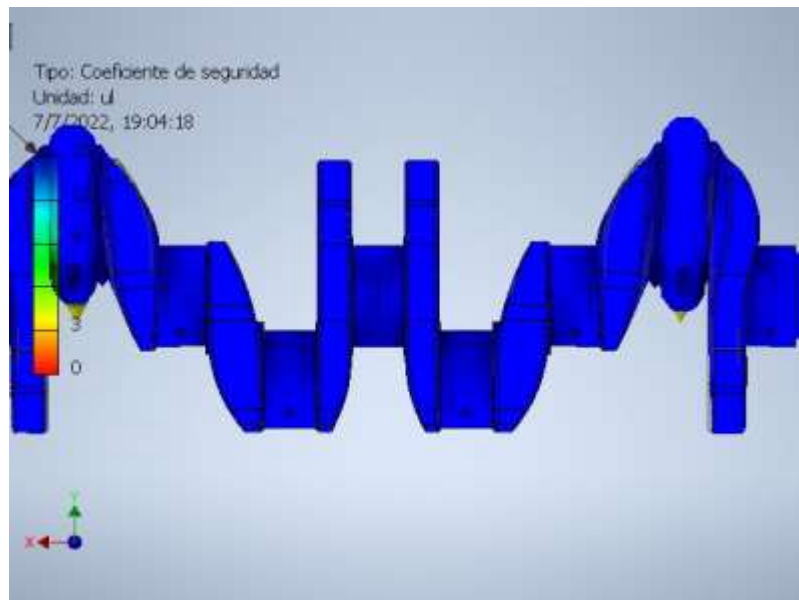
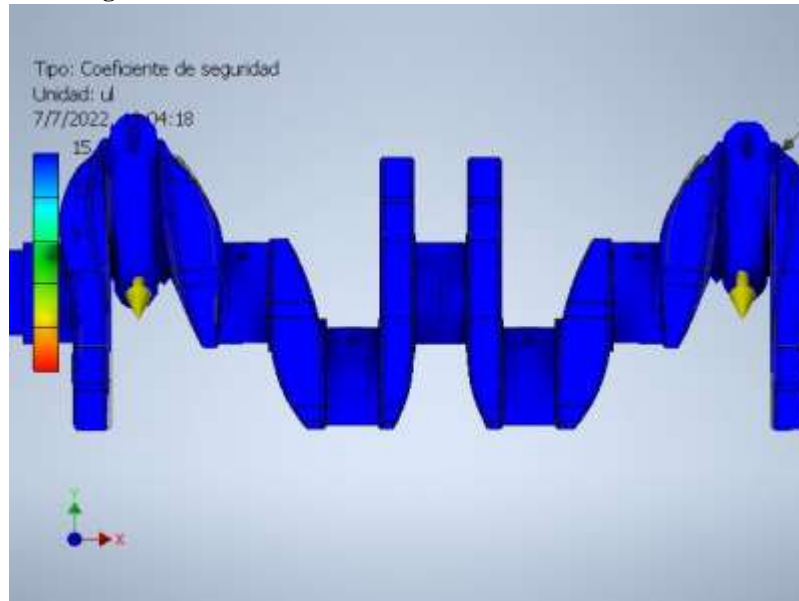
**Primera tensión principal**

**Tercera tensión principal**



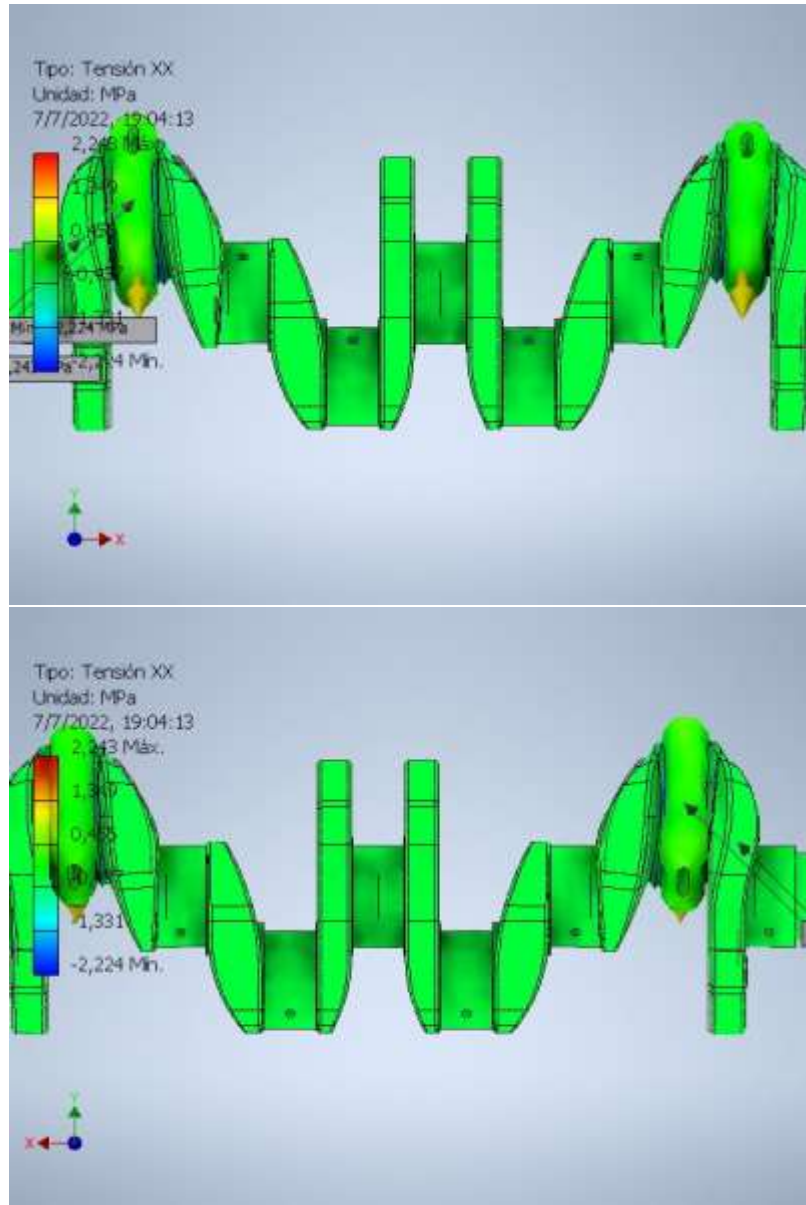
**Desplazamiento**

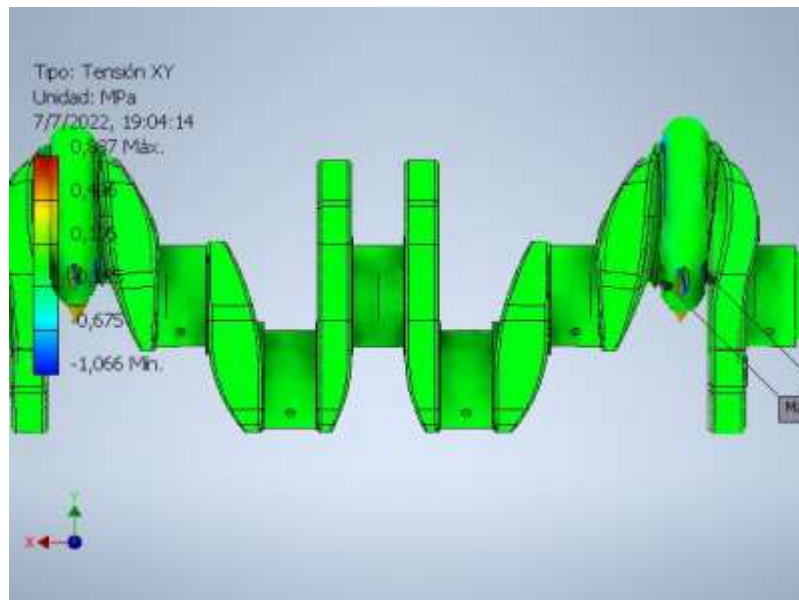
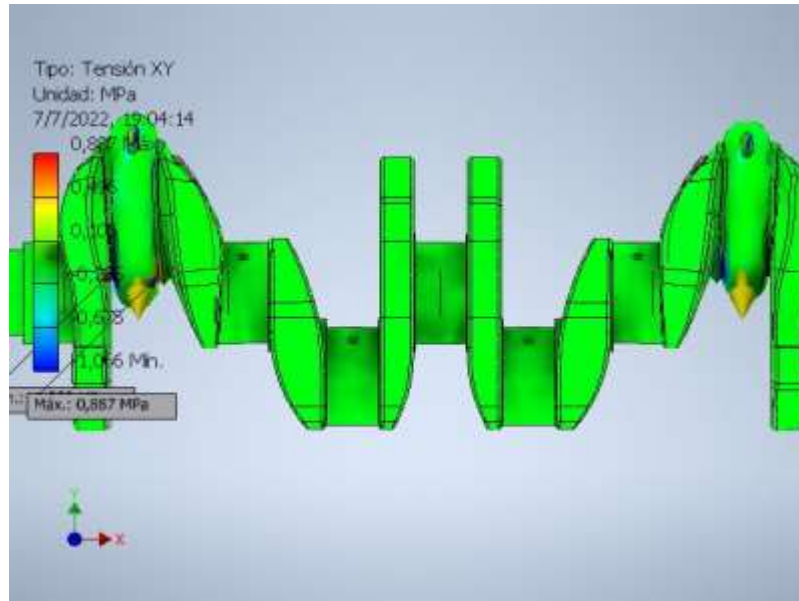


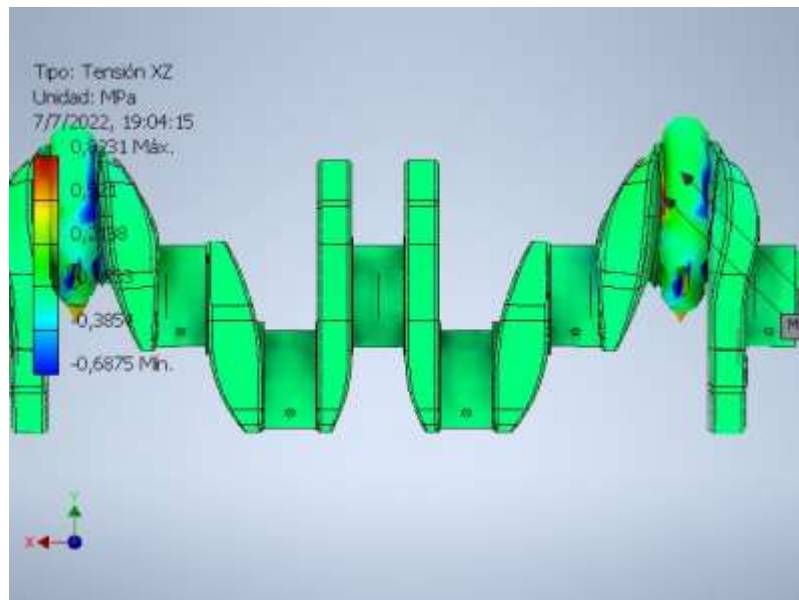
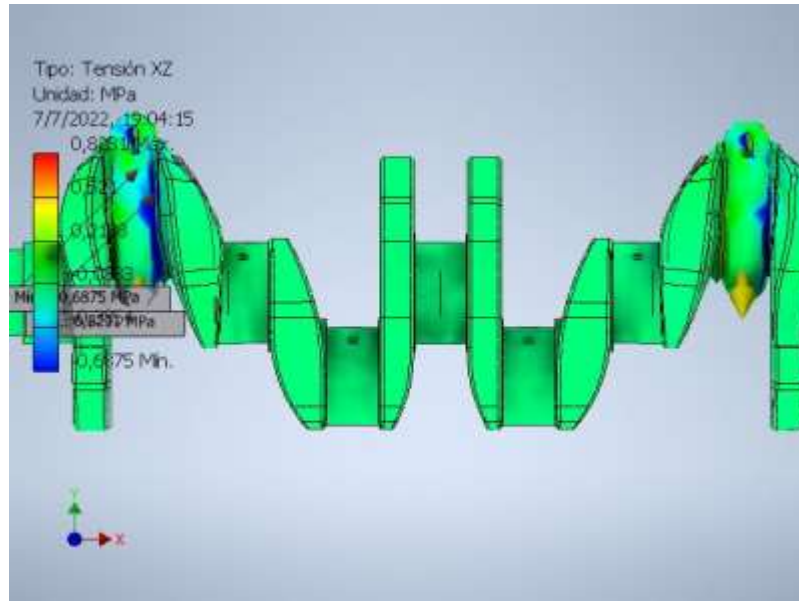
**Coefficiente de seguridad**

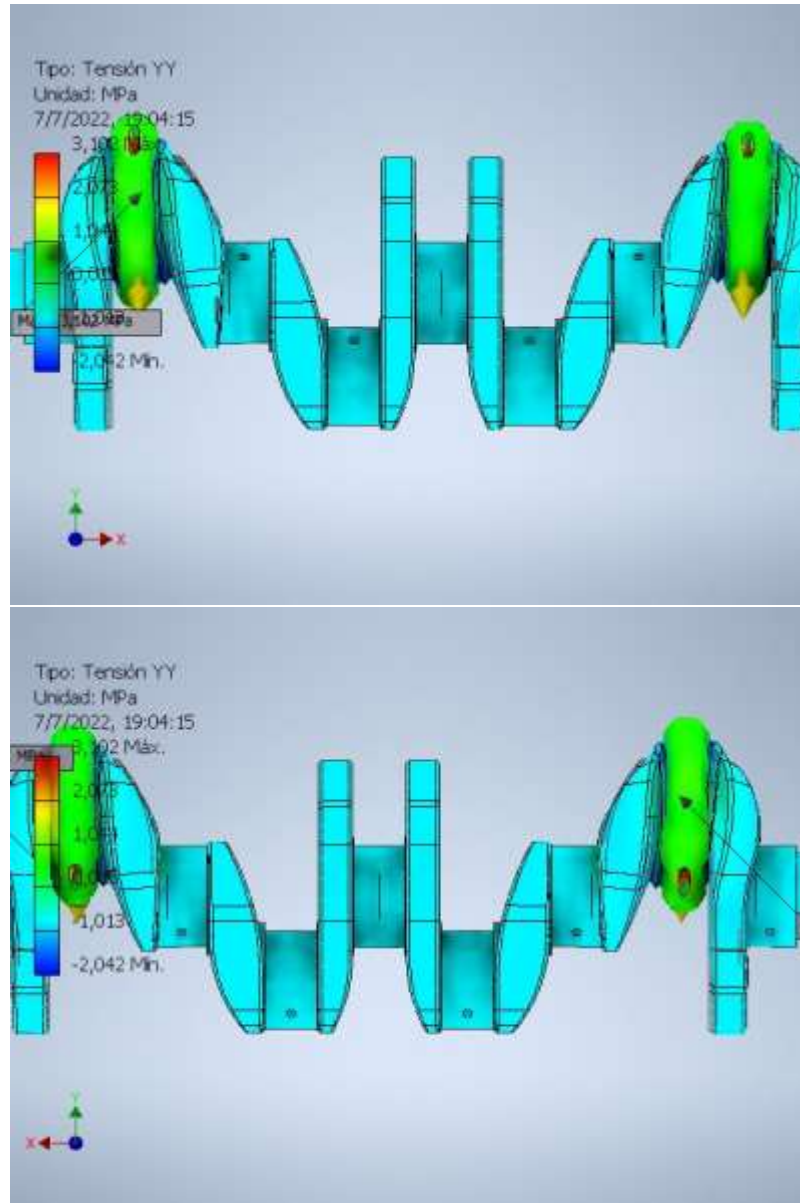


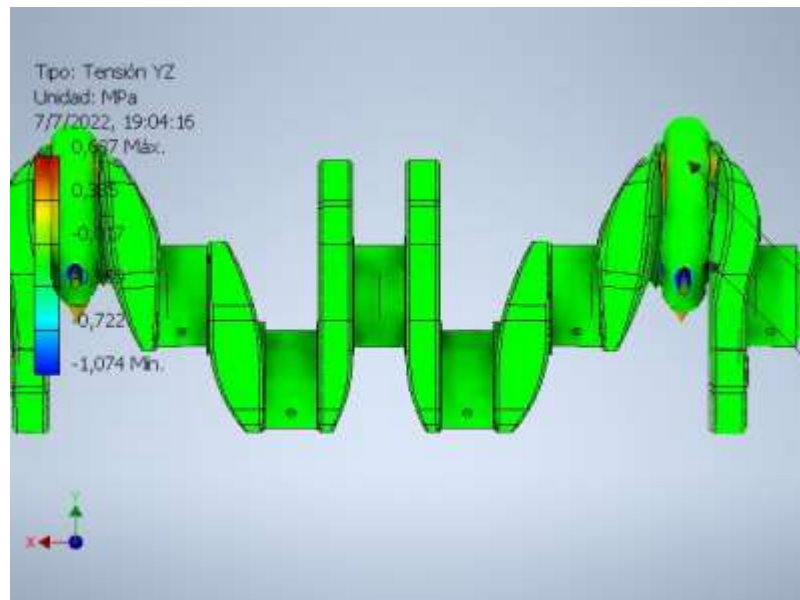
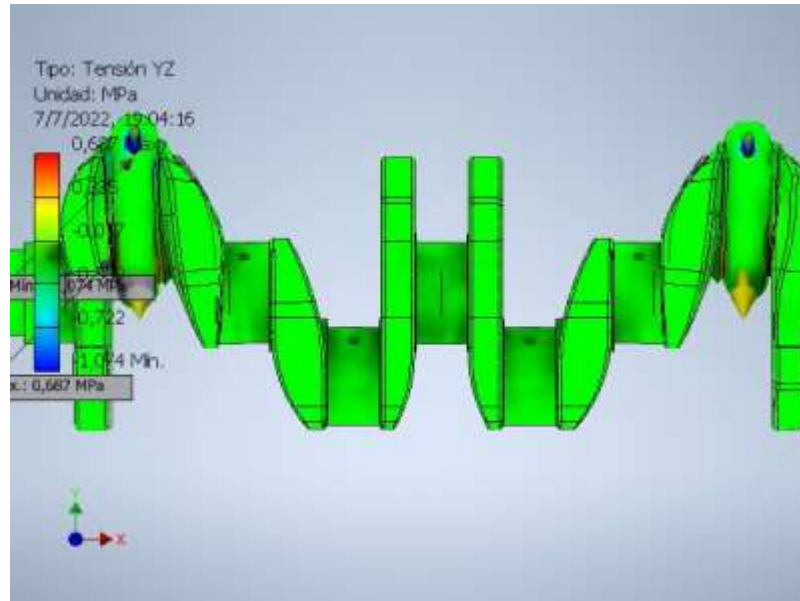
Tensión XX

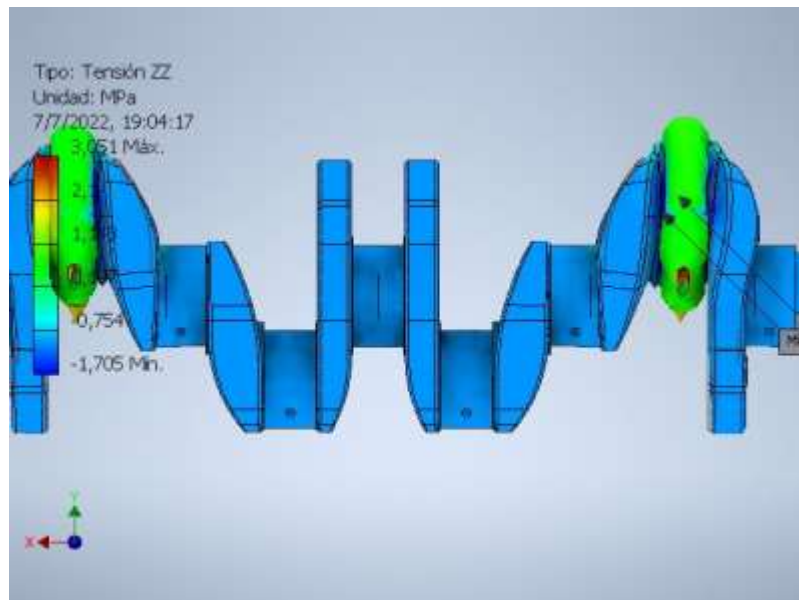
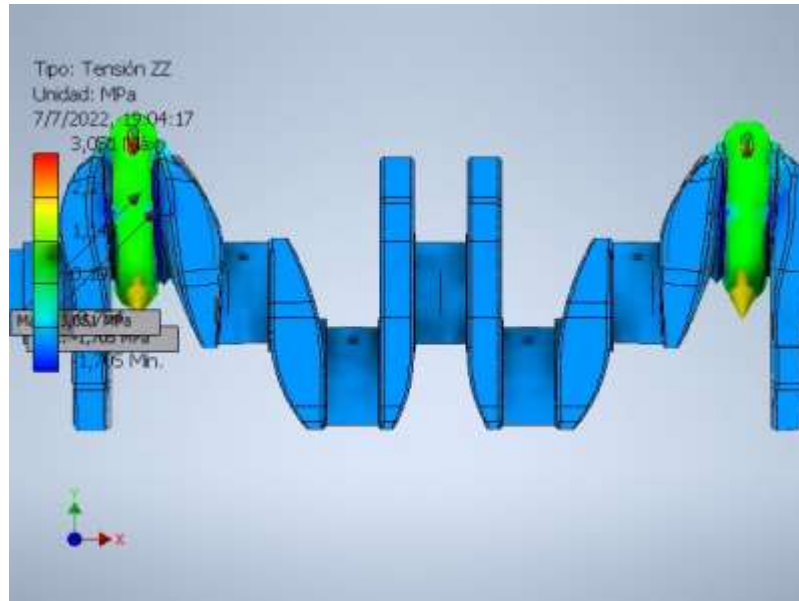


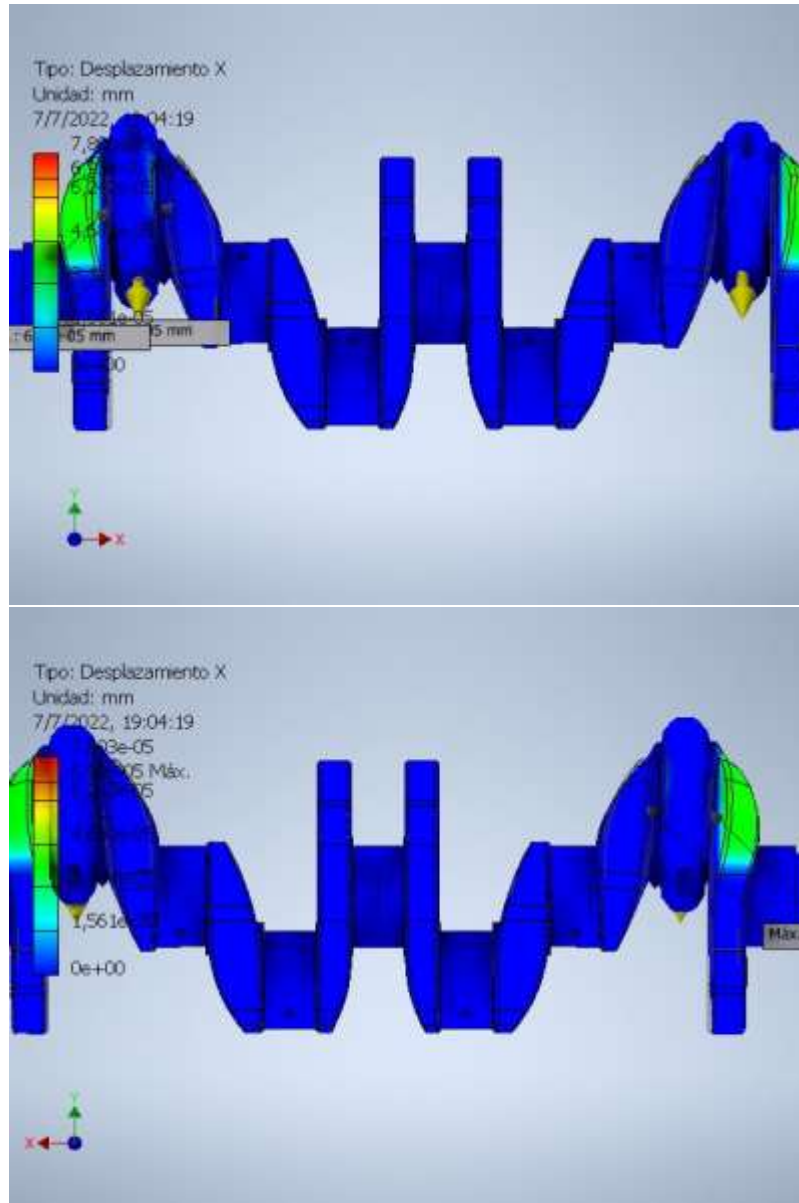
**Tensión XY**

**Tensión XZ**

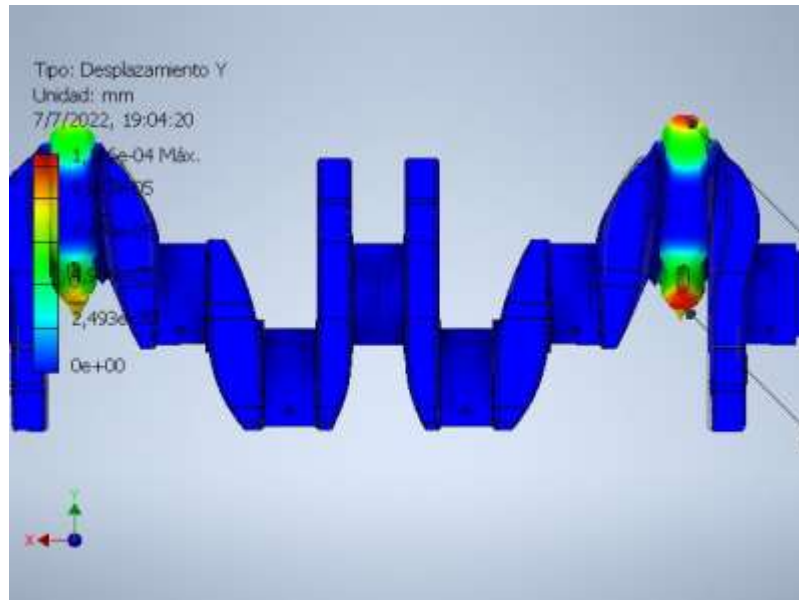
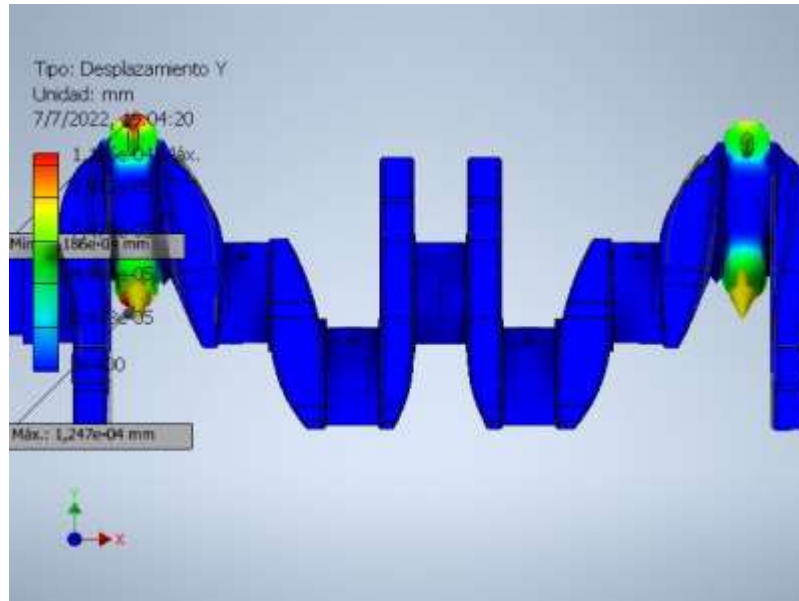
**Tensión YY**

**Tensión YZ**

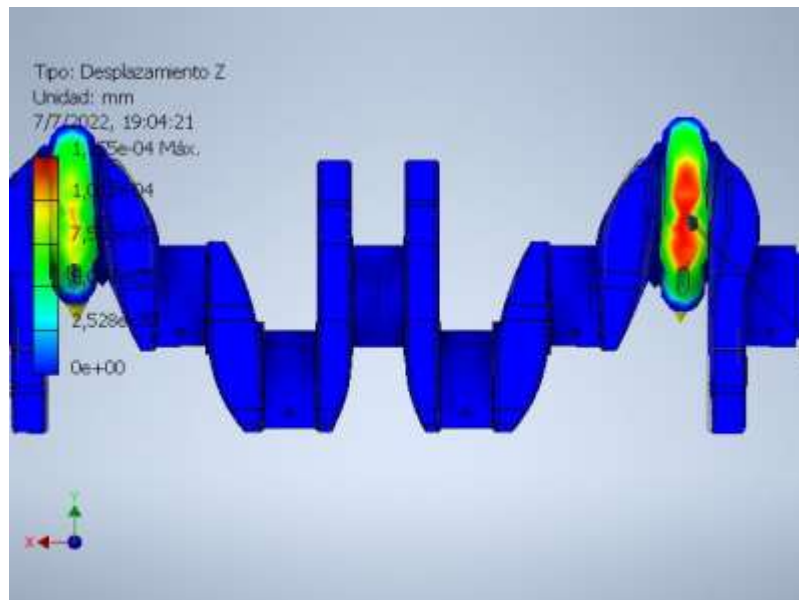
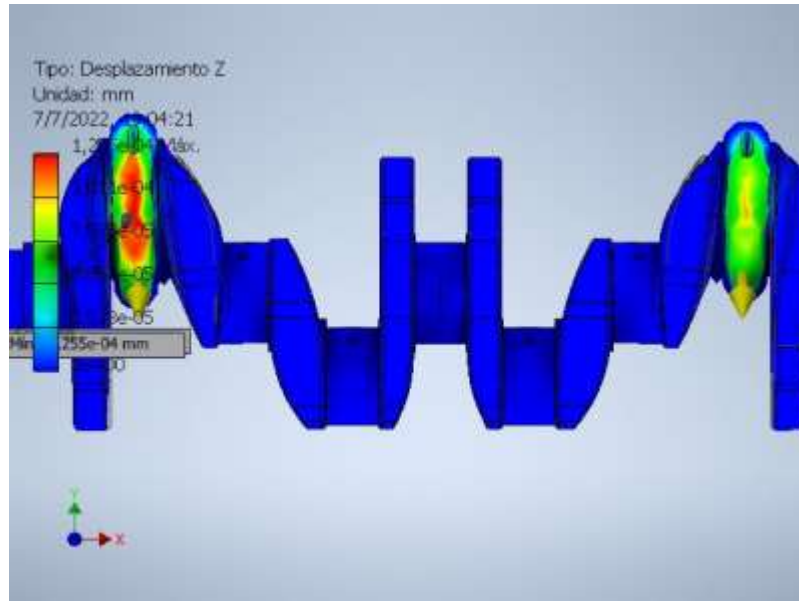
**Tensión ZZ**

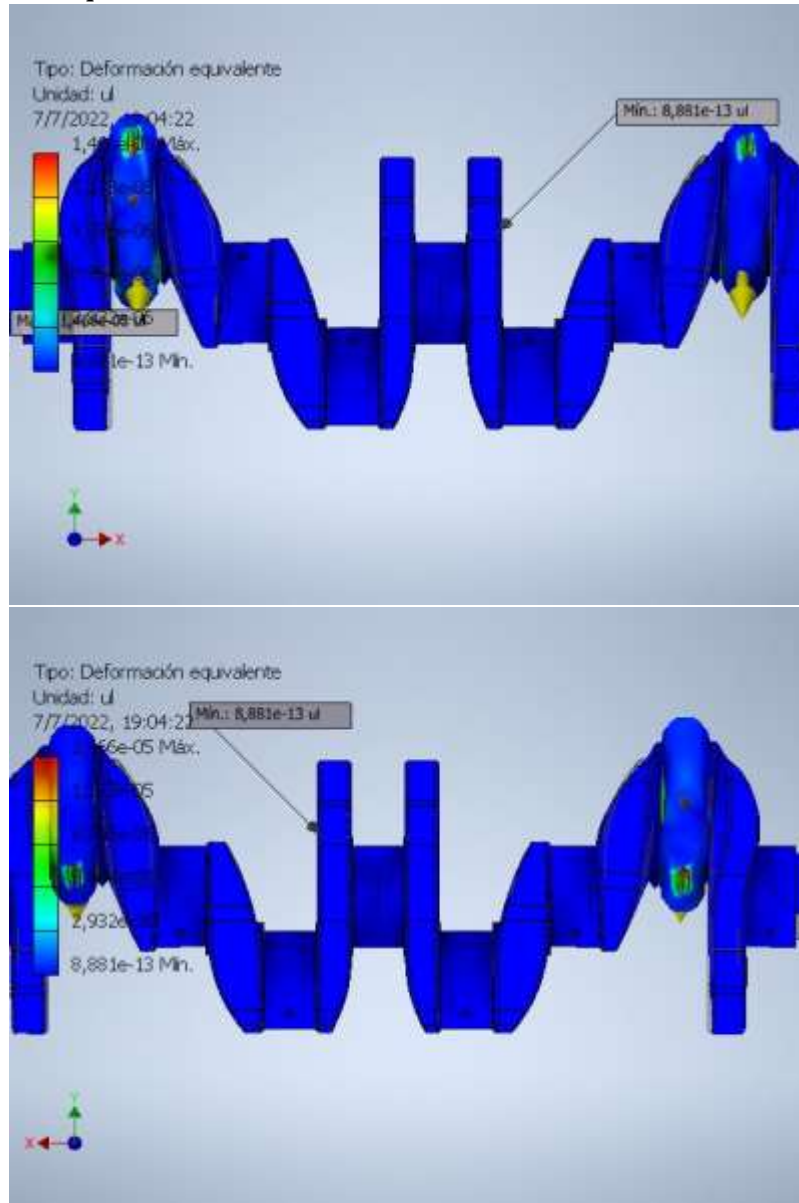
**Desplazamiento X**



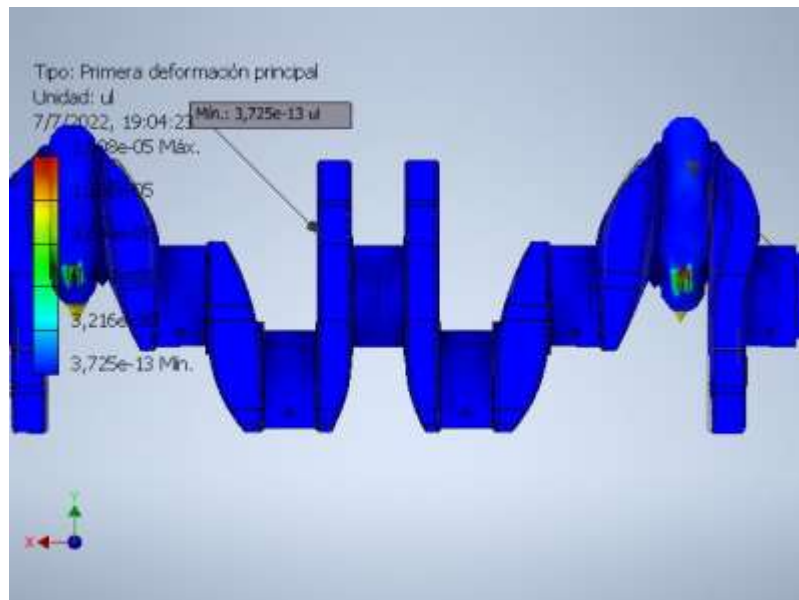
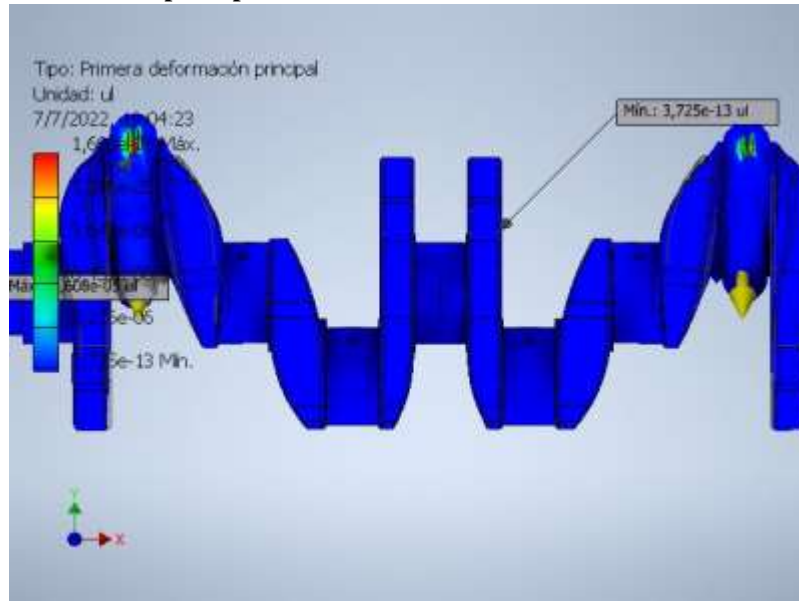
**Desplazamiento Y**

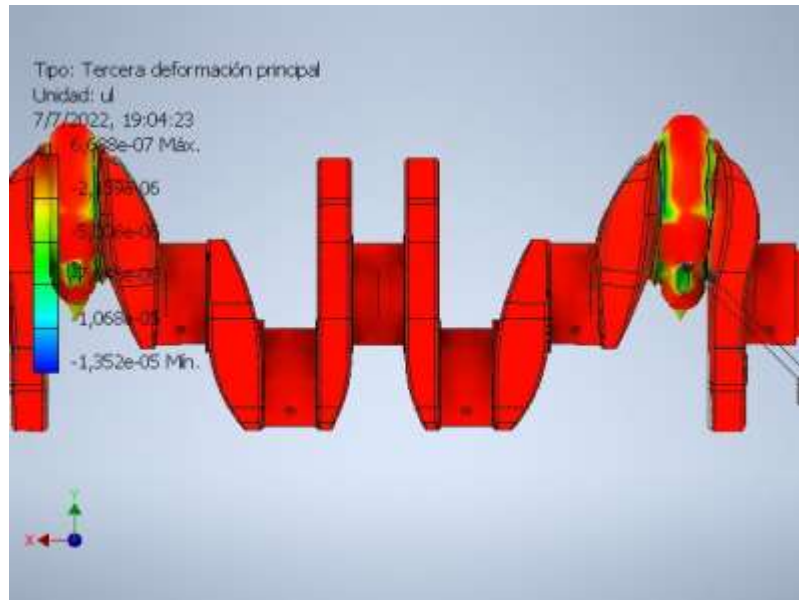
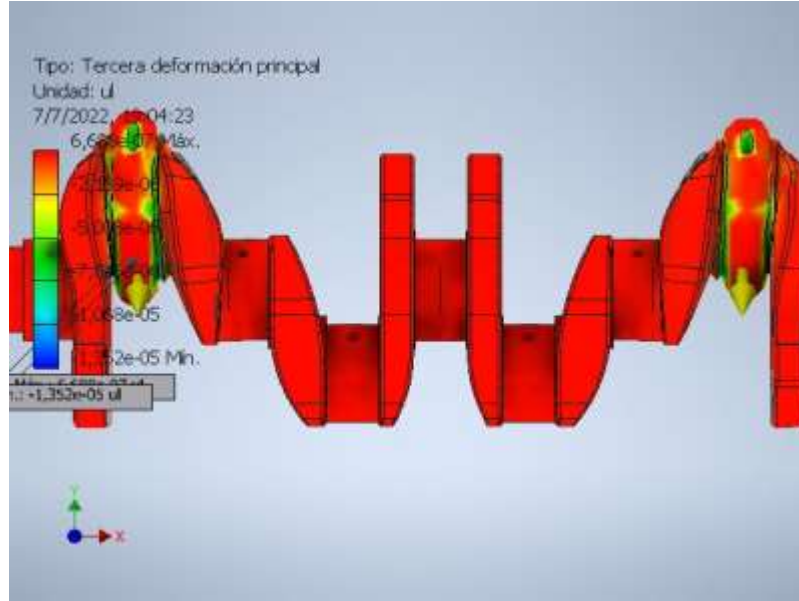


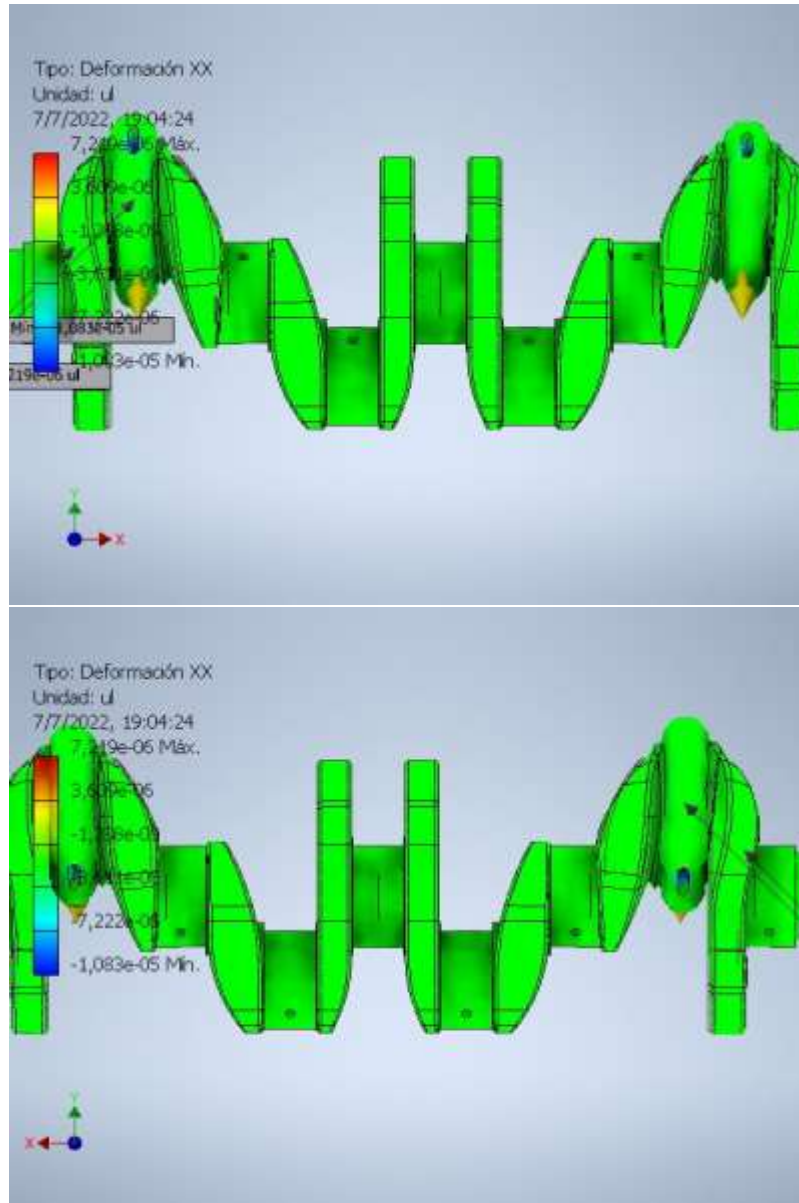
**Desplazamiento Z**

**Deformación equivalente**

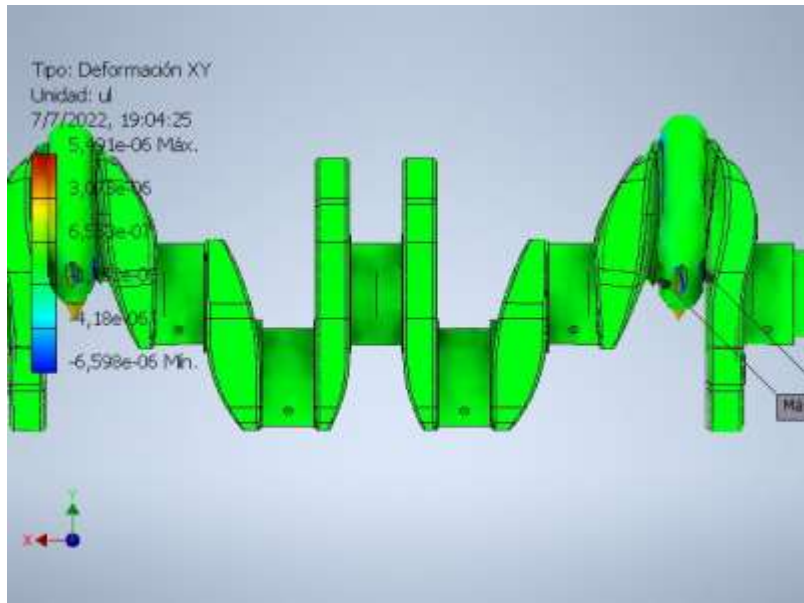
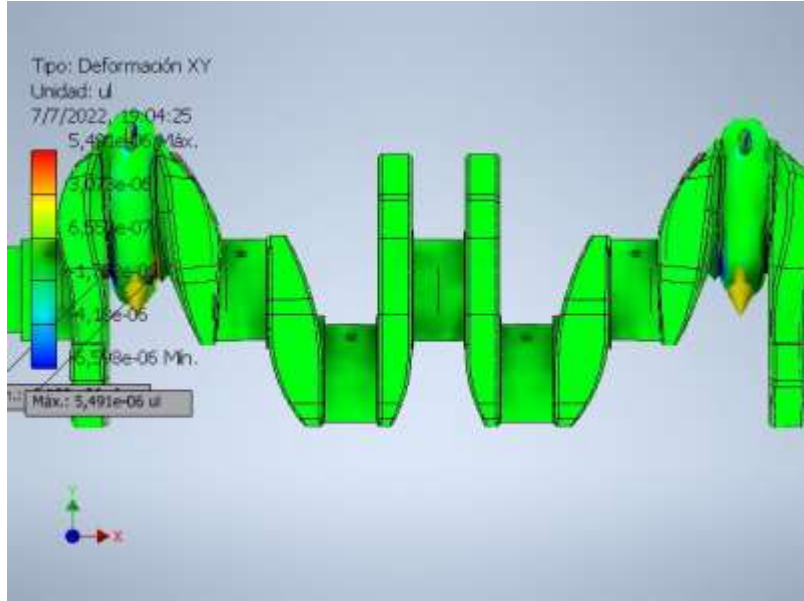
### Primera deformación principal

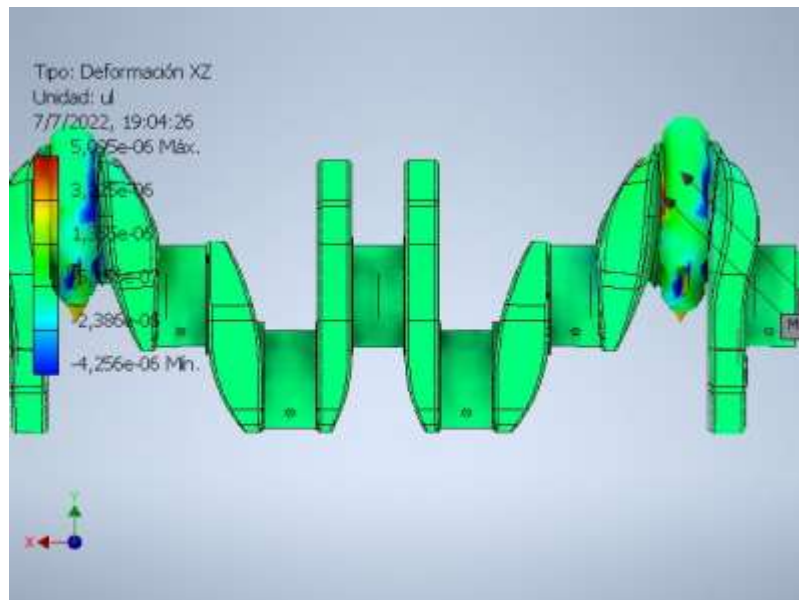
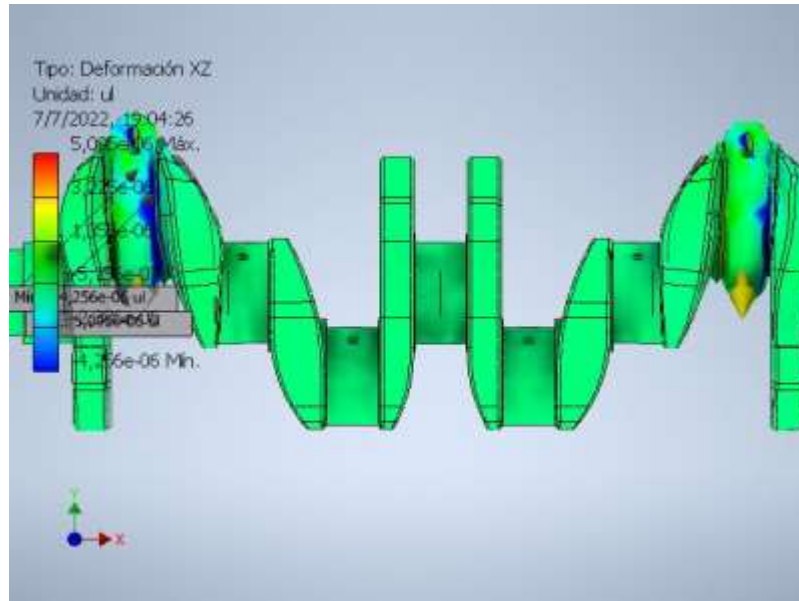


**Tercera deformación principal**

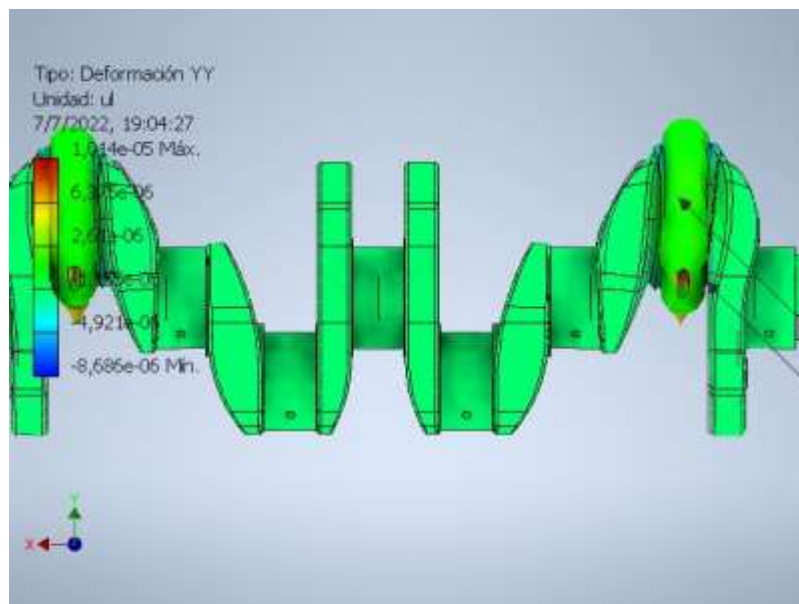
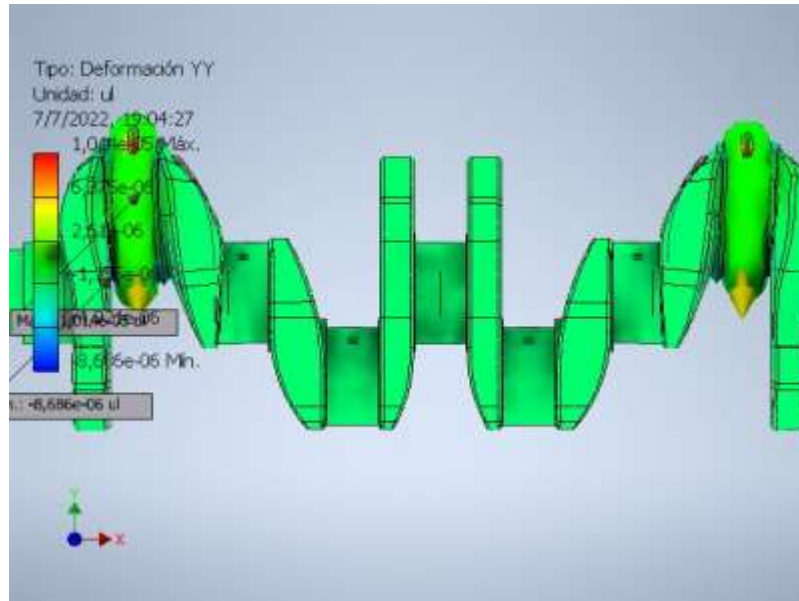
**Deformación XX**

**Deformación XY**

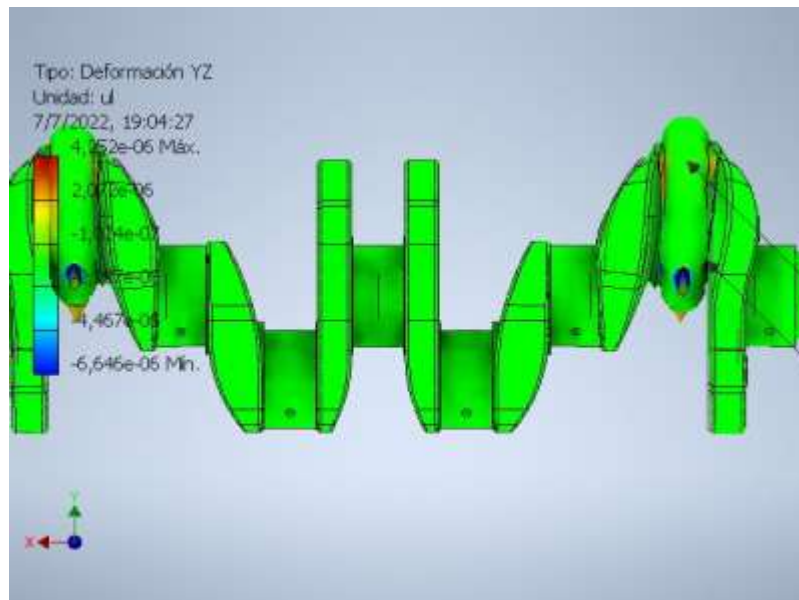
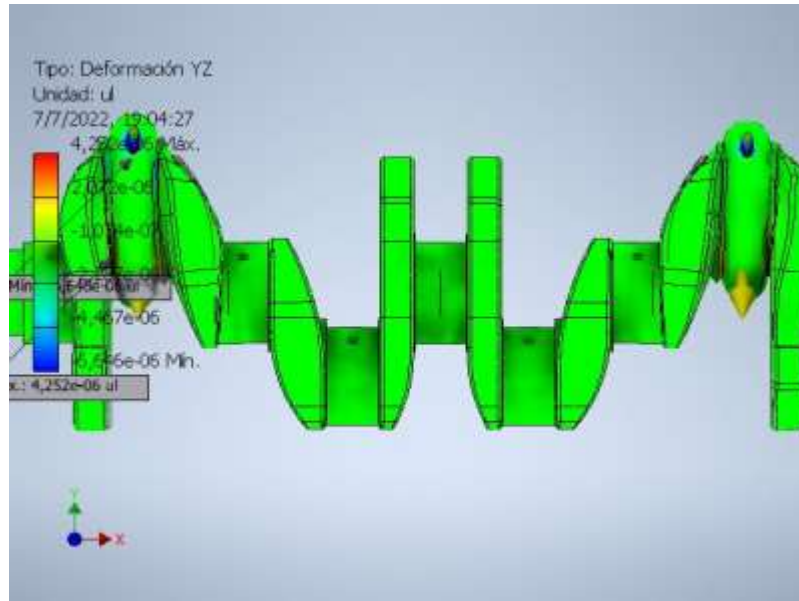


**Deformación XZ**



**Deformación YY**



**Deformación YZ**

**Deformación ZZ**