



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

#### **REDISEÑO Y MANUFACTURA DE UNA AUTOPARTE APLICANDO INGENIERÍA INVERSA Y METODOLOGÍAS CAD/CAM**

**AUTORES:**

**JAIRO ADRIÁN ERAZO PRADO**

**LUIS ALEXANDER QUIROZ ALFÉREZ**

**DIRECTOR: ING. RAMIRO ANDRÉS ROSERO AÑAZCO MSc.**

**Ibarra, 2024**

## CERTIFICADO

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "Rediseño y manufactura de una autoparte aplicando ingeniería inversa y metodologías CAD/CAM" presentado por el señor: Quiroz Alférez Luis Alexander con número de cédula 1004769129, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 29 días del mes octubre del 2024.  
Atentamente

  
Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

## CERTIFICADO

### ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

### CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "Rediseño y manufactura de una autoparte aplicando ingeniería inversa y metodologías CAD/CAM" presentado por el señor: Erazo Prado Jairo Adrián con número de cédula 1004562581, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 29 días del mes octubre del 2024.

Atentamente

  
Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

## AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CEDULA DE IDENTIDAD:</b>	1004769129		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Quiroz Alférez Luis Alexander		
<b>DIRECCIÓN:</b>	El ejido de Caranqui, sector "Puente el laurel"		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:laquiroza@utn.edu.ec">laquiroza@utn.edu.ec</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	N.A	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0986124513
DATOS DE LA OBRA			
<b>TÍTULO:</b>	REDISEÑO Y MANUFACTURA DE UNA AUTOPARTE APLICANDO INGENIERÍA INVERSA Y METODOLOGÍAS CAD/CAM		
<b>AUTOR:</b>	Quiroz Alférez Luis Alexander		
<b>FECHA:</b>	29 de octubre del 2024		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSGRADO	
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ		
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco, MSc.		

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días, del mes de octubre de 2024

**AUTOR:**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Luis Quiroz', is written over a horizontal dotted line.

Quiroz Alferez Luis Alexander

C.I 1004769129

---



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

## AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CEDULA DE IDENTIDAD:</b>	1004562581		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Erazo Prado Jairo Adrián		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Andrade Marín, sector "El carmelo"		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:jaerazop@utn.edu.ec">jaerazop@utn.edu.ec</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	N.A	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0999532937
DATOS DE LA OBRA			
<b>TÍTULO:</b>	REDISEÑO Y MANUFACTURA DE UNA AUTOPARTE APLICANDO INGENIERÍA INVERSA Y METODOLOGÍAS CAD/CAM		
<b>AUTOR:</b>	Erazo Prado Jairo Adrián		
<b>FECHA:</b>	29 de octubre del 2024		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO	<input type="checkbox"/> POSGRADO	
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ		
<b>ASESOR/DIRECTOR:</b>	Ing. Ramiro Andrés Rosero Añezco, MSc.		

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días, del mes de octubre de 2024

**AUTOR:**



Erazo Prado Jairo Adrián

C.I 1004562581

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Joselito Erazo y Gloria Prado quienes han sido el pilar fundamental en mi vida quienes me han apoyado de manera incondicional no solo en mi etapa de estudiante sino a lo largo de mi vida este logro también en suyo.

A ti, Noah, mi amor y compañera en esta aventura. Gracias por ser mi refugio en los días complicados y mi motivación constante para seguir adelante. Tu paciencia, tus palabras de aliento y tu fe en mí fueron fundamentales para alcanzar esta meta. Este logro también te pertenece, porque caminamos juntos cada paso del camino.

**JAIRO ERAZO**

Este trabajo va dedicado a mi madre Blanca Alférez, quien ha sido mi apoyo incondicional durante toda mi etapa de vida y universitaria, gracias a los valores que me ha enseñado en casa desde pequeño, me ha enseñado a valorar el estudio, la vida y luchar por mis sueños, en esta etapa universitaria han existido situaciones difíciles, entre ellas: personales y académicas. Sin embargo, ella me ha enseñado a no rendirme y seguir adelante. A mi hermano Sebastián que también ha sido una inspiración para poder culminar este grado académico, y de esa manera ser un ejemplo para él. En general, a mi familia entera quienes de una u otra manera me han dado la mano de cualquier forma.

**LUIS QUIROZ**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y salud para poder seguir adelante en mis estudios, agradezco a mis padres que con su esfuerzo, amor y ejemplo me han guiado durante todo este proceso académico.

A mi enamorada Noah que gracias a su apoyo incondicional me ayudo a superar cada obstáculo en el transcurso de carrera.

A mis tíos, tías y familia en general, quienes siempre me alentaron y celebraron cada pequeño logro. Su cariño y compañía me dieron fuerzas para superar los desafíos más difíciles.

Agradezco a mi tutor Ing. Ramiro Rosero MSc. que gracias a su paciencia y tutela me ayudo a concluir la tesis de una manera adecuada.

**JAIRO ERAZO**

En primer lugar agradezco a Dios por darme la salud y por consiguiendo la vida, a la virgen del Quinche por darme la sabiduría, la capacidad de sobre llevar una carrera técnica y poder cumplir uno de mis sueños, de la misma manera a la Universidad Técnica del Norte por ser una academia con un alto nivel de educación referente en el norte del país, satisfaciendo la parte teórica con la práctica, a la carrera de Ingeniería Automotriz a todos sus docentes que fueron parte de este camino universitario, y como también a todos mis compañeros de aula.

Al Ing. Ramiro Rosero MSc. que, como docente director, es una persona con paciencia, y mucha empatía en cada reunión que se ha realizado en conjunto, para poder culminar nuestro trabajo de investigación.

**LUIS QUIROZ**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	I
ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE ANEXOS .....	IX
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	X
RESUMEN .....	XI
ABSTRACT .....	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XIV
CAPÍTULO I.....	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1 HISTORIA DE LA MAQUINARIA PESADA .....	1
1.1.1. TIPOS DE MAQUINARIA PESADA .....	2
1.1.1.1. Excavadora Sobre Cadena.....	2
1.1.1.2. Retroexcavadora Sobre Ruedas.....	2
1.1.2. PARTES PRINCIPALES DE UN BRAZO ARTICULADO .....	3
1.1.2.1. Pluma.....	3
1.1.2.2. Brazo.....	4
1.1.2.3. Cucharón.....	5
1.1.2.4. Cilindro.....	6
1.1.2.5. Puente H .....	7
1.1.3. FUERZA DE EXCAVACIÓN.....	8
1.1.3.1. Fuerza de Empuje del Brazo.....	8
1.1.3.2. Fuerza de Excavación del Cucharón .....	9
1.2. MÁQUINAS Y MECANISMOS .....	9
1.2.1. CINEMÁTICA .....	10
1.2.2. ESLABONES .....	10
1.2.3. DIAGRAMAS CINEMÁTICOS.....	10
1.2.4. GRADOS DE LIBERTAD.....	11
1.2.4.1. Ecuación de Gruebler. ....	13

1.3.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	13
1.3.1.	MATERIALES EN EL DISEÑO DE MÁQUINAS .....	14
1.3.1.1.	Propiedades Físicas.....	14
1.3.1.2.	Propiedades Mecánicas.....	14
1.3.2.	METALES Y ACEROS .....	16
1.3.2.1.	Materiales Férricos .....	17
1.3.2.2.	Acero de Fabricación para Maquinaria .....	17
1.4.	HERRAMIENTAS CAD/CAE .....	18
1.4.1.	DISEÑO CAD .....	18
1.4.2.	ANÁLISIS FEM.....	19
1.5.	IMPRESIÓN 3D.....	20
1.5.1.	TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN .....	20
1.5.2.	MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.....	21
1.5.3.	CADENA DE OPERACIONES EN LOS PROCESOS FA .....	22
1.5.3.1.	Modelado 3D.....	22
1.5.3.2.	Exportación al Formato de Impresión. ....	23
1.5.3.3.	Generación de Código G .....	23
CAPÍTULO II.....		25
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
2.1.	METODOLOGÍA.....	25
2.2.	REVISIÓN DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	26
2.2.1.	COMPORTAMIENTO MECÁNICO .....	27
2.2.1.1.	Registro de las Tensiones Máximas de la Retroexcavadora.....	27
2.2.2.	OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	27
2.3.	OBTENCIÓN DE DATOS Y MODELIZACIÓN DEL ESLABÓN H.....	28
2.3.1.	ESCANER EINSTAR 3D .....	28
2.3.2.	ESCANEADO 3D DEL ESLABÓN ORIGINAL .....	29
2.3.3.	DIGITALIZACIÓN Y MODELADO DEL ESLABÓN DE POTENCIA ...	30
2.3.4.	POST PROCESAMIENTO DEL MODELO EN SOFTWARE CAD.....	31
2.4.	SIMULACIÓN CAE .....	32
2.4.1.	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DEL MECANISMO .....	32
2.4.1.1.	Generación del Diagrama Cinemático.....	33
2.4.2.	CÁLCULO DE FUERZA EN EL ESLABÓN DE POTENCIA.....	34
2.4.2.1.	Validación de Simulación Cálculo .....	35

2.4.3.	ANÁLISIS DEL ESLABÓN DE POTENCIA POR FEM.....	44
2.4.3.1.	Etapa 1: Aplicación del Material Original.....	45
2.4.3.2.	Selección de material a través del diagrama de Michael Ashby .....	45
2.4.3.3.	Material alternativo de construcción .....	47
2.4.3.4.	Etapa 2: Generación del Mallado .....	48
2.4.3.5.	Etapa 3: Condiciones de Borde para el Análisis del Elemento Original ...	50
2.5.	OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA.....	50
2.5.1.	APLICACIÓN DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL .	51
2.5.2.	REDISEÑO DEL ESLABÓN MEDIANTE OPTIMIZACIÓN .....	52
2.5.3.	CONDICIONES PARA EL ANÁLISIS MODELO 1 Y 2 .....	53
2.5.4.	CASO ESPECIAL .....	55
2.5.4.1.	Cálculo de Fuerza Asimétrica.....	55
2.5.4.2.	Condiciones para el Análisis de Torsión .....	56
2.6.	CONFIGURACIÓN PARA LA ETAPA MANUFACTURA ADITIVA.....	57
2.6.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA IMPRESORA CR-6- MAX .....	57
2.6.2.	EXPORTACIÓN DEL FORMATO STL EN SOFTWARE CAD .....	58
2.6.3.	AJUSTE DE IMPRESIÓN DEL SÓLIDO .....	58
2.6.4.	PERSPECTIVA DE PROTOTIPADO EN SOFTWARE CURA.....	59
CAPÍTULO III .....		61
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	61
3.1.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	61
3.1.1.	MASA.....	61
3.1.2.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MODELO ORIGINAL (D0) CON MATERIAL AISI 1522(M0).....	62
3.1.3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 1(D1) CON MATERIAL AISI 1522 (M0).....	63
3.1.4.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 2 (D2) CON MATERIAL AISI 1522 (M0).....	65
3.1.5.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO ORIGINAL (D0) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1) .....	67
3.1.6.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 1 (D1) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1) .....	69
3.1.7.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 2 (D2) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1) .....	71

3.1.8. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 1(D1) CON MATERIAL AISI 1522 (M0).....	74
3.1.9. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 2(D2) CON MATERIAL AISI 1522 (M0).....	75
3.1.10. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 2(D2) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1) .....	77
3.2. RESULTADOS DEL PROTOTIPO A PARTIR DE LA IMPRESIÓN 3D .....	79
3.3. ANÁLISIS DE COSTOS DE FABRICACIÓN DE UN PROCESO VIABLE ....	79
CAPITULO IV .....	83
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
4.1. CONCLUSIONES.....	83
4.2. RECOMENDACIONES .....	85
REFERENCIAS .....	86
ANEXOS .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ejemplos de grados de libertad.....	12
Tabla 1.2 Aceros comunes en maquinaria pesada .....	17
Tabla 1.3 Herramientas CAD y sus ventajas .....	19
Tabla 1.4 Herramientas CAE y sus ventajas .....	20
Tabla 1.5 Modos de impresión 3D .....	21
Tabla 2.1 Especificaciones de Einstar 3D Hand Scanner.....	29
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas AISI 1522 .....	45
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas planchas de acero distribuidas localmente .....	47
Tabla 2.4 Propiedades mecánicas Acero Anti-Abrasivo .....	48
Tabla 2.5 Optimización Topológica y Rediseño del Eslabón .....	53
Tabla 2.6 Especificaciones de CR-6- MAX.....	57
Tabla 3.1 Detalle de masa por modelo y material .....	61
Tabla 3.2 Comparativa de criterios del análisis FEM con material original (M0).....	67
Tabla 3.3 Comparativa de criterios del análisis FEM con material alternativo (M1) .....	73
Tabla 3.4 Comparativa de criterios FEM en condiciones extremas .....	78
Tabla 3.5 Presentación de prototipos, diseño original y alternativos .....	79
Tabla 3.6 Materia prima plancha.....	80
Tabla 3.7 Materia prima eje.....	80
Tabla 3.8 Costo de procesos de fabricación Modelo 1 (D1) .....	81
Tabla 3.9 Costo de fabricación del modelo 1(D1) con material Anti- Abrasivo(M1) .....	81
Tabla 3.10 Costo de procesos de fabricación Modelo 2(D2) .....	82
Tabla 3.11 Costo de fabricación del modelo 2(D2) con material Anti-Abrasivo (M1) .....	82

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Historia de la maquinaria pesada .....	1
Figura 1.2 Retroexcavadora hidráulica.....	3
Figura 1.3 Pluma.....	4
Figura 1.4 Brazo mecánico.....	5
Figura 1.5 Cazo convencional .....	6
Figura 1.6 Cilindros hidráulicos .....	7
Figura 1.7 Eslabón H y laterales.....	7
Figura 1.8 Disposición angular de la pluma y brazo .....	8
Figura 1.9 Representación de diagramas cinemáticos.....	11
Figura 1.10 Curva esfuerzo – deformación .....	15
Figura 1.11 Representación teórica del módulo de Young .....	16
Figura 1.12 Proceso FDM .....	22
Figura 1.13 Generación de código G.....	23
Figura 2.1 Flujograma general del proyecto.....	25
Figura 2.1 Flujograma general del proyecto (Continuación...)	26
Figura 2.2 Uso de Einstar 3D hand scan .....	30
Figura 2.3 Modelo escaneado.....	31
Figura 2.4 Modelado 3D del eslabón original en base a escaneo 3D.....	31
Figura 2.5 Escaneo 3D general del mecanismo.....	32
Figura 2.6 Diagrama cinemático del brazo excavador .....	34
Figura 2.7 Asignación de juntas en el mecanismo .....	35
Figura 2.8 Asignación de desplazamientos en el mecanismo .....	35
Figura 2.9 Simulación del movimiento del cucharón.....	36
Figura 2.10 Posición del cucharón en software CAD en 0.7 s .....	36
Figura 2.11 Coordenadas y distancias entre puntos A-H-P.....	37
Figura 2.12 Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón .....	37
Figura 2.13 Obtención y corroboración de datos en Rigid Dynamics.....	38
Figura 2.14 Mecanismo en la posición 1 .....	39
Figura 2.15 Distancias entre puntos A-H-P en la posición 1.....	40
Figura 2.16 Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón en la posición 1 .....	40
Figura 2.17 Valor de fuerza FH según la variación del ángulo $\beta$ en la posición 1 .....	41
Figura 2.18 Mecanismo en la posición 2.....	42

Figura 2.19 14Coordenadas y distancias entre puntos A-H-P en la posición 2.....	42
Figura 2.20 Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón en la posición 2 .....	43
Figura 2.21 Valor de fuerza FH según la variación del ángulo $\beta$ en la posición 2 .....	44
Figura 2.22 Graficos por familia de materiales .....	46
Figura 2.23 Diagrama comparativo entre el módulo de young y la densidad .....	47
Figura 2.24 Espectro de métrica de calidad de malla .....	49
Figura 2.25 Mallado del modelo original .....	49
Figura 2.26 Condiciones de borde en el modelo original.....	50
Figura 2.27 Geometría Aproximada a Partir de Optimizacion Topológica .....	51
Figura 2.28 Segunda geometría aproximada a partir de optimización topológica .....	52
Figura 2.29 Optimización del modelo 1 .....	54
Figura 2.30 Optimización del modelo 2 .....	54
Figura 2.31 Valor de carga aplicada y Factor de seguridad .....	55
Figura 2.32 Condiciones de borde para el modelo 1 y 2 .....	56
Figura 2.33 Condiciones de borde para el modelo 1 y 2 .....	56
Figura 2.34 Fase de transformación del modelo 3D a STL.....	58
Figura 2.35 Configuración de parámetros en software UltiMaker Cura .....	59
Figura 2.36 Ajuste de rotacion, patron de relleno, grosor del relleno .....	60
Figura 3.1 Esfuerzo de Von Mises D0-M0.....	62
Figura 3.2 Deformación máxima D0-M0 .....	62
Figura 3.3 Factor de seguridad D0-M0 .....	63
Figura 3.4 Esfuerzo de Von Mises D1-M0.....	64
Figura 3.5 Deformación máxima D1-M0 .....	64
Figura 3.6 Factor de seguridad D1-M0 .....	65
Figura 3.7 Esfuerzo de Von Mises D2-M0.....	65
Figura 3.8 Deformación máxima D2-M0 .....	66
Figura 3.9 Factor de seguridad D2-M0 .....	66
Figura 3.10 Esfuerzo de Von Mises D0-M1.....	68
Figura 3.11 Deformación máxima D0-M1 .....	68
Figura 3.12 Factor de seguridad D0-M1 .....	69
Figura 3.13 Esfuerzo de Von Mises D1-M1.....	70
Figura 3.14 Deformación máxima D1-M1 .....	70
Figura 3.15 Factor de seguridad D1-M1 .....	71
Figura 3.16 Esfuerzo de Von Mises D2-M1.....	72

Figura 3.17 Deformación máxima D2-M1 .....	72
Figura 3.18 Factor de seguridad D2-M1 .....	73
Figura 3.19 Esfuerzo de Von Mises D1-M0.....	74
Figura 3.20 Deformación máxima D1-M0 .....	74
Figura 3.21 Factor de seguridad D1-M0 .....	75
Figura 3.22 Esfuerzo de Von Mises D2-M0.....	76
Figura 3.23 Factor de seguridad D2-M0 .....	76
Figura 3.24 Esfuerzo de Von Mises D2-M1.....	77
Figura 3.25 Deformación máxima D2-M1 .....	77
Figura 3.26 Factor de seguridad D2-M1 .....	78

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I.....	90
ANEXO II.....	91
ANEXO III .....	92
ANEXO IV .....	93
ANEXO V .....	95
ANEXO VI.....	96
ANEXO VII.....	98
ANEXO VIII .....	100
ANEXO IX.....	101
ANEXO X .....	102
ANEXO XI.....	104
ANEXO XII.....	105
ANEXO XIII .....	105
ANEXO XIV .....	106

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Fuerza de penetración.....	9
Ecuación 1.2 Fuerza de cucharón.....	9
Ecuación 1.3 Grados de libertad.....	13
Ecuación 1.4 Esfuerzo.....	15
Ecuación 2.1 GDL caso real.....	33
Ecuación 2.2 Sumatoria de momentos arbitraria.....	38
Ecuación 2.3 Sumatoria de momentos posición 1.....	41
Ecuación 2.4 Sumatoria de momentos posición 2.....	43

## RESUMEN

La presente investigación, abarca el estudio de la ingeniería inversa, con un enfoque multidisciplinario basado en optimización topológica como una técnica a partir del análisis estático estructural que se encarga de desarrollar nuevas alternativas de construcción de un modelo, para este caso específico, basado en el eslabón de potencia H de una retroexcavadora CAT 420E. Para ello se ha hecho uso de herramientas computacionales como parte de un proceso tecnológico, además de la aplicación de criterios de diseño de máquinas y mecanismos, criterios de optimización topológica para la obtención de resultados que no puedan afectar su viabilidad dentro del proceso de fabricación. En función de lo planteado, el tema Rediseño y manufactura de una autoparte aplicando ingeniería inversa y metodologías CAD/CAM abarca las siguientes temáticas de estudio. Inicialmente se ha definido un proceso de retro ingeniería aplicado en un componente mecánico del brazo articulado, a partir de la selección de la pieza, se ha trabajado su obtención de datos, a través del método de escaneo tridimensional y para la modelización de este, el uso del Software SolidWorks. Luego, se definió solicitudes y requerimientos del componente a través de un análisis cinemático para la obtención de parámetros operativos normales al que se encuentra sometido el eslabón, para este punto se hizo uso del módulo Rigid Dynamics perteneciente al software ANSYS, una vez obtenido estos valores se procedió a generar el análisis CAE, se aplicó todas las etapas de simulación desde las decisiones preliminares hasta su interpretación de resultados, a partir de allí se hizo uso del módulo Structural Optimization siguiendo criterios de diseño y en base a los resultados que arrojó, se ha seleccionado la mejor alternativa para entrar a una etapa de refinación del modelo, mismo que se validó su rendimiento y puesta a punto en su aplicación en condiciones reales. Finalmente, el desenlace de la investigación concluye en la fabricación de los prototipos como la última fase de un proceso tecnológico, en este apartado se empleó el método de manufactura aditiva para la presentación de los modelos.

## ABSTRACT

This research covers the study of reverse engineering, with a multidisciplinary approach based on topological optimization as a technique from the structural static analysis that is responsible for developing new alternatives for building a model, for this specific case, based on the power link H of a CAT 420E backhoe. For this, computational tools have been used as part of a technological process, in addition to the application of design criteria for machines and mechanisms, topological optimization criteria to obtain results that cannot affect their viability within the manufacturing process. Based on the above, the topic Redesign and manufacturing of an auto part applying reverse engineering and CAD / CAM methodologies covers the following study topics. Initially, a reverse engineering process applied to a mechanical component of the articulated arm has been defined, from the selection of the part, its data has been obtained through the three-dimensional scanning method and for its modeling, the use of SolidWorks Software. Then, requests and requirements of the component were defined through a kinematic analysis to obtain normal operating parameters to which the link is subjected, for this point the Rigid Dynamics module belonging to the ANSYS software was used, once these values were obtained, the CAE analysis was generated, all the simulation stages were applied from preliminary decisions to their interpretation of results, from there the Structural Optimization module was used following design criteria and based on the results it threw, the best alternative has been selected to enter a stage of model refinement, which was validated for its performance and fine-tuning in its application in real conditions. Finally, the outcome of the investigation concludes the manufacture of the prototypes as the last phase of a technological process, in this section the additive manufacturing method was used for the presentation of the models.

## **LISTA DE SIGLAS**

**AEADE.** Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador

**FS.** Safety Factor

**CAD.** Computer Aided Desing

**CAM.** Computer Aided Manufacturing

**CAE.** Computer Aided Engineering

**GDL.** Grados de libertad

**FEM.** Método de elementos finitos

**FDM.** Modelado por Deposición Fundida

**FA.** Additive Manufacturing

**ASTM.** American Society for Testing and Materials

**AISI.** American Iron and Steel Institute

## INTRODUCCIÓN

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Si bien es cierto en Ecuador existe un alto índice de unidades de maquinaria pesada y equipo caminero con un buen rendimiento operacional en las diferentes áreas de trabajo que son de uso común en la minería, obras de construcción, mantenimiento vial y demás. No obstante, el desarrollo investigativo de la maquinaria pesada a nivel local es muy bajo debido a la falta de instalaciones para el entrenamiento académico que tiene como objetivo mejorar la metodología teórico-práctico, es por eso la continua demanda de prestaciones, en términos de ligereza, tamaño y peso denota la necesidad de una nueva propuesta de optimización estructural.

En este sentido se comprende que para dar solución a este inconveniente se prevé demostrar una serie de procesos ordenados haciendo uso de herramientas computacionales para simular el rendimiento operacional de todos los elementos que componen el mecanismo de una retroexcavadora en condiciones reales y generar un análisis estructural que pueda ser viable dentro de un proceso de optimización topológica.

De ahí nace la presente investigación, la misma se realizará con el objetivo de fabricar un prototipo basado en el diseño de un eslabón de potencia H de una retroexcavadora CAT 420E, a través de herramientas CAD, para optimizar el diseño se hará uso del software ANSYS versión estudiantil con ello se verificará si el modelo a seguir es viable o no dentro de un proceso de fabricación.

### JUSTIFICACIÓN

Si bien es cierto en Ecuador existen 2 empresas dedicadas al ensamblaje de vehículos de carga liviana y semi pesados tales como: Ciauto, Aymesa. No obstante, el porcentaje de piezas y autopartes usadas dentro de los procesos de producción a nivel local es bajo. Sin embargo, en los últimos 10 años esta área automotriz ha superado y logrado satisfacer gran parte de la demanda nacional con productos de alta calidad.

En función de lo planteado se afirma que durante las 2 últimas décadas ha existido un alto incremento exponencial y significativo en la venta de unidades ensambladas en Ecuador, en concreto, en el 2022 se comercializaron 20310 vehículos ensamblados a nivel nacional, siendo este un 14.6% de ventas totales por ensamblaje en la industria automotriz (Aeade & Autoplus, 2022).

Dentro de este marco se menciona que, “El porcentaje más alto en la historia de la industria automotriz de componentes ecuatorianos conforma el 22% de componente local del vehículo, demostrando la calidad y perfección del producto ecuatoriano” (CIAUTO, 2019).

Por otro lado, uno de los factores a considerar en el sector automotor es la participación de los aranceles, se menciona que entre los acuerdos comerciales y negociaciones de mayor interés para el sector automotriz se destacan las naciones: México, China, Corea del Sur. Los aranceles más elevados varían en un intervalo entre el 30 a 40 % para países como Estados Unidos, México y Japón. Sin embargo, para países como Colombia el arancel es del 0 %, mientras que para Argentina y Brasil es del 28%. En el caso del continente europeo actualmente se paga un 5 % pero se espera que en posteriores años llegue al 0 % gracias al tratado de libre comercio con la unión europea (Aeade & Autoplus, 2022).

Así mismo, se sigue poniendo en marcha la investigación en la selección de materiales compuestos que se deben usar para la producción de una pieza, con ello se pretende motivar a la sociedad local en generar procesos de manufactura de elementos automotrices, como también facilitar la obtención de piezas en un menor tiempo sin alterar el factor calidad-precio para el parque automotor.

Dentro del plan de creación de oportunidades 2021 – 2025 denota la necesidad de resaltar algunos ejes económicos y la matriz actual de generación de empleo como un instrumento más de justificación para el desarrollo de este proyecto. En ese sentido, de acuerdo con el INEC se compara que el nivel de desempleo en el año 2016(5,2%) hasta el año 2019 (3,8%) tiende a bajar considerablemente. Sin embargo, para el año 2020 el mismo incrementó en un (1,2%) con relación al año 2019 (Secretaría Nacional de Planificación, 2021).

Debe señalarse que conforme los datos que emite el ministerio de economía y finanzas durante las 2 últimas décadas la producción manufacturera fue el sector que más aportó utilidad, de hecho, el mismo representa el 12 % del PIB, asimismo consolida el 10% de empleabilidad nacional.

Por tal motivo el desarrollo del presente proyecto de investigación permitirá demostrar la sucesión de procesos necesarios para llevar a cabo la fabricación de un prototipo basado en el desarrollo de un eslabón de potencia H, por lo tanto se idealiza generar el diseño mencionado a través de la metodología “ingeniería inversa” para la obtención de datos y por consiguiente tratar el modelo en un software de diseño CAD para definir dimensiones, trazados, en general su

geometría con las herramientas disponibles en la interfaz, con la obtención de la geometría se procede a llevarlo a un software CAE para la etapa de análisis, simulación y para finalizar, el uso de una impresora 3D para la obtención de prototipo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Fabricar y optimizar una autoparte a través de ingeniería inversa, instrumentos CAD/CAE y manufactura aditiva.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir un proceso de ingeniería inversa aplicado a maquinaria pesada basado en optimización topológica y manufactura aditiva.
- Generar un modelo CAD y simular su trabajo mecánico a través de un software computacional CAE, aplicando técnicas de optimización estructural para analizar el rendimiento operacional.
- Evaluar los resultados mediante una comparativa entre la pieza y el elemento obtenido a partir del análisis sistemático basado en optimización topológica.
- Construir el prototipo basado en el diseño del eslabón de potencia H optimizado, impreso en 3D para satisfacer la propuesta de manufactura.

## **ALCANCE**

El presente proyecto de investigación pretende fabricar un prototipo basado en el diseño de un eslabón de potencia H a través de un proceso de escaneo 3D el cual satisface el apartado ingeniería inversa mismo que permitirá la obtención de las dimensiones del objeto mencionado, para posteriormente trasladarlo al software SolidWorks versión estudiantil, por consiguiente el software CAD nos generará un archivo step mismo que será trasladado al software ANSYS versión estudiantil para la etapa de análisis del sistema, y por último para satisfacer la propuesta de manufactura se diseñará un prototipo a escala, se debe agregar también que para la realización del trabajo de titulación se hará uso de una impresora 3D de bajo costo, se resalta que la elección del equipo a usarse dentro del proceso de manufactura fue en función de las necesidades que el proyecto requería.

Visto de esta forma este trabajo busca optimizar la topología del mecanismo de barra eslabón H que conforma el brazo mecánico de una retroexcavadora sin afectar las propiedades mecánicas del mismo, es decir, que la rigidez y resistencia del mecanismo no se vean afectados, es por ello

que para este estudio se pretende generar un diagrama cinemático general de los elementos mecánicos tales como; pluma, el brazo, laterales, eslabón y cuchara únicamente como objeto de estudio teórico.

En lo esencial, el desenlace de esta investigación aspira a la manufactura del prototipo de un eslabón de potencia H optimizado, si bien es cierto el resultado obtenido será un prototipo a escala y por consiguiente la autoparte como un elemento de fundamento teórico. No obstante, esto servirá para futuros planes de fabricación válida del eslabón en condiciones operativas.

# CAPÍTULO I

## 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

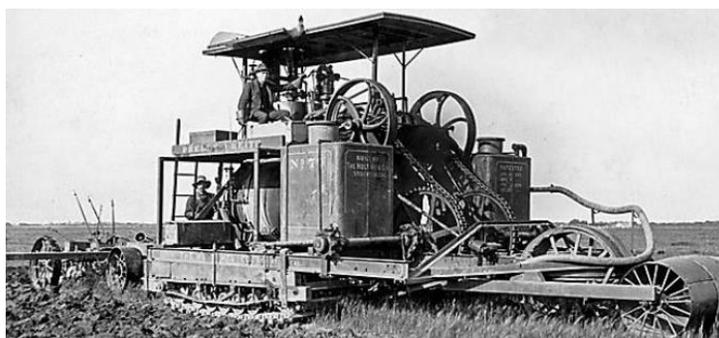
### 1.1 HISTORIA DE LA MAQUINARIA PESADA

La reseña histórica de la maquinaria pesada se remota en el año 1890 cuando Benjamín Holt inicia su trayectoria al crear el primer tractor propulsado a vapor para que éste sea usado en las grandes haciendas. Sin embargo, tuvo que pasar una década para que su invento diera resultado y el mismo pueda ser presentado.

Algunos años después la compañía Caterpillar le muestra al mundo una nueva flota de maquinaria pesada esta vez con un nuevo sistema de propulsión, es decir, en lugar de usar vapor se utilizó gas como fuerza de impulsión. En ese sentido, la transición energética va cambiando considerablemente, así que la compañía americana moderniza una vez más su matriz de flotas, es por ello en el año 1931 se hace uso del Diesel como nuevo carburante.

En ese sentido se menciona que Estados Unidos fue el primer país en innovar para llevar a cabo un proceso diferente de mano de obra, primero en agricultura, luego la construcción cambiando así la próspera tradición de mecanización (Alberto & Hillebrand, 2016).

La mano de obra en esa época es abundante y el alcance de los proyectos es pequeño, y como resultado, se reduce la motivación para mejorar la productividad en por eso que tras encontrar muchos problemas el fabricante norteamericano de equipos y pionero del desarrollo constante trae consigo soluciones, en un principio con fallos e intermitencias, pero con el paso de los años sus máquinas se han ido perfeccionando.



**Figura 1.1** Historia de la maquinaria pesada  
(Ricardo Alberto Chegwin Hillebrand, 2016)

En la figura 1.1 se muestra una breve introducción a la maquinaria pesada, sobre cómo fue desarrollada, con el fin de ahorrar la abundancia de mano de obra y su limitación operativa en cuanto a términos de trabajo y eficiencia en áreas de minería y construcción. Visto de esta forma, es de suma importancia conocer algunos aspectos más importantes de la maquinaria pesada como operaciones, transporte, tareas que puede efectuar en distintas condiciones laborales, en términos de rendimiento y eficiencia.

Según (INEI, 2019) define que, la maquinaria pesada es un vehículo automotor que permite llevar a cabo múltiples tareas tales como la construcción, obras industriales, mecanización y movimiento de tierras, la misma es caracterizada por ser muy robusta y resistente gracias a todos los equipos, sistemas autopropulsados que posee y sobre todo al amplio progreso tecnológico que se ha implementado durante las últimas décadas desde su aparición.

### **1.1.1. TIPOS DE MAQUINARIA PESADA**

Desde un enfoque general la maquinaria pesada es conformada por diferentes maquinas, equipos autopropulsados sobre las ruedas que son utilizadas en diferentes actividades según el requerimiento de trabajo, por consiguiente, satisfacer una necesidad, es por ello dentro de su clasificación podemos mencionar el Bulldozer, excavadora hidráulica, cargadora frontal entre otras.

#### **1.1.1.1. Excavadora Sobre Cadena.**

La retroexcavadora hidráulica sobre cadena es un tipo de maquinaria destacada principalmente por su gran aplicación y eficiencia en trabajos de excavación, extracción de tierras, carga de material minero y de construcción, se diferencia principalmente de la sobre ruedas porque es más robusta y sus amplias aplicaciones en condiciones extremas de trabajo donde se dificulta la adherencia con el suelo (Tiktin & Colegio de Ingenieros de Caminos, 2013).

#### **1.1.1.2. Retroexcavadora Sobre Ruedas.**

Debido al alcance y capacidad de cazo pequeño este tipo de excavadoras necesitan apoyos laterales que se encuentren adheridos en su chasis principal, esto para que en su proceso de trabajo la plataforma se mantenga estable y no se mueva.

Es cierto que cada tipo de maquinaria pesada cumple con una función específica, en efecto y para en el caso de la excavadora la misma es distinguida por poseer exclusivamente un brazo hidráulico junto a un mecanismo de barras que permiten el movimiento hacia una pala o

cucharón, el mismo actúa como contacto directo entre el material y las garras que posee la cuchara.

Visto de esta forma, en cuanto a su modo de funcionamiento, en general parte de la energía mecánica obtenida en el motor, esta energía es utilizada para el accionamiento de los brazos hidráulicos que posee el sistema, esta energía hidráulica atraviesa por varios conductos y válvulas que tienen como finalidad transformar esta energía en energía mecánica para mover todos los elementos mecánicos que posee el brazo hidráulico, es decir, existe un mecanismo de barra y pistón para cada elemento que lo compone



**Figura 1.2** Retroexcavadora hidráulica  
(Archi Expo, n.d.)

Si bien es cierto su nombre indica una tarea específica la cual es cavar, pero también puede mover, rotar, desplazar y transportar objetos como se muestra en la figura 1.2 En ese sentido, el equipo es utilizado generalmente para remover sistemas de desagües, canales de agua, extracción de materiales de construcción y para cavar altas pendientes, en general en obras de construcción civil.

### **1.1.2. PARTES PRINCIPALES DE UN BRAZO ARTICULADO**

Si bien es cierto el brazo articulado se compone de sistemas hidráulicos, mecánicos y auxiliares. No obstante, en ese caso se hará énfasis únicamente al comportamiento mecánico del mecanismo, es decir, a la bancada, cilindros, brazo, pluma, cucharón, eslabón y laterales.

#### **1.1.2.1. Pluma**

Básicamente es el elemento que conforma una parte estructural de la excavadora la misma es encargada de realizar el proceso de movimiento de elevación y descenso en conjunto con la sincronización de los cilindros hidráulicos. Así mismo gracias a este elemento se hace posible

su aplicación en un rango más extenso lo cual denota una mayor demanda multifuncional gracias a su robustez.

En ese sentido se menciona que la variedad de trabajos a la que es capaz de realizar va desde su aplicación en trabajos de movimiento de las tierras hasta procesos de construcción en obras a nivel escalar.

Por lo tanto, la pluma se la puede dividir de dos tipos:

- Monobloque, este tipo de pluma es conformada de una sola pieza, es decir, el diseño de la pluma trabaja como un mecanismo de una sola barra.
- Conformada por dos piezas, como su nombre lo indica, dicho de otra manera, es un mecanismo articulado de dos barras, este tipo de diseño presenta ciertos inconvenientes en su utilización, debido a que al existir una barra extra denota la necesidad de agregar un cilindro hidráulico más.



**Figura 1.3** Pluma  
(Archi Expo, n.d.)

En la figura 1.3 se muestra el componente mecánico, pluma de tipo monobloque la cual se diferencia radicalmente de la conformada.

#### **1.1.2.2. Brazo**

Básicamente es el elemento que conforma una parte del mecanismo de la retroexcavadora, el mismo cumple la función de unir la pluma con el cucharón de manera articulada y su movimiento está ligado a la acción que genera un cilindro hidráulico.

Debe señalarse que actualmente se siguen implementando metodologías de optimización en cuanto al análisis y comportamiento mecánico para satisfacer las necesidades de trabajo y mejorar la capacidad de carga en condiciones reales.



**Figura 1.4** Brazo mecánico

Obtenido de: Archi Expo (Archi Expo, n.d.)

Como se muestra en la figura 1.4 el brazo es el encargado de soportar la mayor cantidad de rigidez cuando el mecanismo realiza tarea, mismo que es accionado por un cilindro y una bomba de tipo oleo hidráulico.

### **1.1.2.3. Cucharón**

También conocido como “cazo” en términos técnicos, básicamente es el elemento que se encuentra en contacto directo con la superficie de material donde se va a trabajar, el mismo se divide en tres tipos:

- Cazo convencional, en efecto el más utilizado el mismo es accionado a través del movimiento que realiza el cilindro hidráulico, generando el arranque inicial del eslabón.
- Cazo de descarga, este tipo de cuchara actualmente es el más moderno. Sin embargo, su aplicación es exclusivamente para retroexcavadoras de accionamiento frontal.
- Cazo vibrante, básicamente su función inicial es aplicada a través del uso de un cilindro hidráulico que va acoplado junto al cucharón en un mecanismo de 2 barras que permiten su accionamiento, generalmente tiene más ciclos de trabajo gracias a su sistema hidráulico. Sin embargo, es más pesado, difícil de desmontar por lo tanto la mano de obra en términos de mantenimiento es costoso.



**Figura 1.5 Cazo convencional**

Obtenido de: (Enrique et al., 2017)

Si bien es cierto las retroexcavadoras pueden cambiar de configuración y ser utilizadas como otro tipo de herramientas, por ejemplo, un martillo hidráulico. No obstante, en el presente trabajo se centra en tomar la configuración más típica de trabajo, es decir, ensamblada a un cucharón. En la figura 1.5 se muestra el cucharón convencional para aplicaciones de obra civil, e infraestructura.

#### **1.1.2.4. Cilindro**

El cilindro es un elemento que forma parte del sistema hidráulico, básicamente su funcionamiento parte de una bomba, la misma que es accionada por el motor, a través de mangueras de alta presión, y de un conjunto de horquillas móviles que se desplazan independientemente según la necesidad, en ese sentido se pueden mencionar algunos tipos de cilindros hidráulicos aplicados en la maquinaria pesada.

- Cilindro de simple efecto, el mismo es movido hidráulicamente en un solo sentido, ya que su desplazamiento opuesto es realizado ya sea a través de un muelle o en función de la gravedad.
- Cilindro de doble efecto, como se indica en su nombre este tipo de cilindro se desplaza en ambos sentidos mediante la energía hidráulica, es por ello tiene dos acoplamientos, una para comprimir el pistón y otra para extraer el mismo.
- Cilindro de doble vástago, este tipo de cilindro tiene una particularidad en cuanto al movimiento que este puede generar, ya que en existen dos vástagos que permiten el recorrido en ambos lados, por lo tanto, la fuerza y velocidad son iguales en ambos lados.



**Figura 1.6** Cilindros hidráulicos

Obtenido de: (Archi Expo, n.d.)

Como se muestra en la figura 1.6 el cilindro de tipo telescópico el es más utilizado en aplicaciones de maquinaria pesada, su característica principal se basa en que el mismo puede ser de tipo simple o doble efecto, ya que depende de la necesidad. Sin embargo, en la mayoría de los casos el de doble efecto es el más usado

#### 1.1.2.5. Puente H

Básicamente es un elemento que trabaja en conjunto con dos elementos llamados “laterales” los cuales forman un mecanismo articulado, el mismo que transforma la presión recibida del cilindro hidráulico en una fuerza paralela de giro del cucharón. En ese sentido, se puede mencionar algunos tipos de enlaces que permiten la articulación de los eslabones.



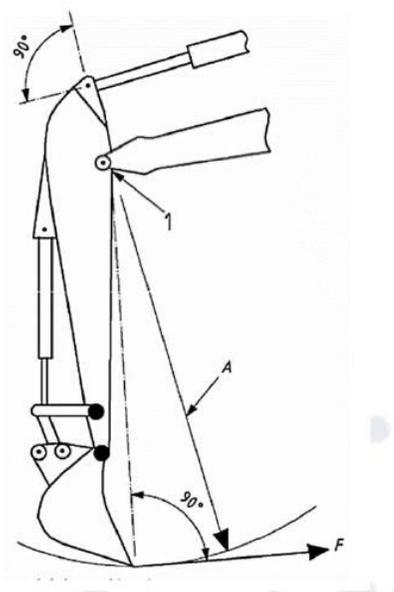
**Figura 1.7** Eslabón H y laterales

Obtenido de: (Archi Expo, n.d.)

La configuración básica de articulación entre el eslabón y el cazo es mediante sus alojamientos junto con unos laterales como se muestra en la figura 1.7 los mismos son los encargados de generar un punto de apoyo desde el actuador en conjunto con los ambos lados del eslabón.

### 1.1.3. FUERZA DE EXCAVACIÓN

Si bien es cierto, la fuerza que se aplica desde la pluma hacia el cucharón de la retroexcavadora es realizado a través de un sistema hidráulico que se encuentra conformado por conductos y cilindros. No obstante, la acción que realiza el cucharón es directamente proporcional a dos fuerzas actuantes, es decir, fuerza de empuje del brazo y fuerza de excavación del cucharón.



**Figura 1.8** Disposición angular de la pluma y brazo  
Obtenido de:(Enrique et al., 2017)

La posición mostrada en la figura 1.8 se encuentra en con valores de tipo arbitrarios, los mismos no están definidos, ya que para analizar el comportamiento mecánico se debe generar un ensayo con distintos valores y de esa manera encontrar la carga máxima de operación.

#### 1.1.3.1. Fuerza de Empuje del Brazo

Básicamente esta fuerza es accionada a través de un sistema hidráulico que acciona el movimiento de un cilindro la cual es llamada también como fuerza de penetración la misma se puede calcular a través de la siguiente expresión matemática.

### **Ecuación 1.1 Fuerza de penetración**

$$Fb = \frac{F1 \times a}{b} \quad [1.1]$$

Donde:

Fb: Fuerza de penetración

F1: Fuerza del cilindro del brazo

a: Distancia entre la articulación de la pluma con el cilindro accionador del brazo (mm)

b: Longitud del brazo (mm)

#### **1.1.3.2. Fuerza de Excavación del Cucharón**

Generada por la fuerza del cilindro hidráulico que actúa en sí mismo y que es aplicada sobre la superficie del cucharón, esta fuerza es llamada fuerza de excavación de manera técnica y es la fuerza que realiza el cucharón para extraer material o realizar trabajo.

En ese sentido es posible obtener la magnitud de dicha fuerza, haciendo uso de la siguiente fórmula.

### **Ecuación 1.2 Fuerza de cucharón**

$$Fg = \frac{F2 \times c}{d} \quad [1.2]$$

Donde:

Fg: Fuerza del cazo

F2: Fuerza del cilindro del cucharón

c: distancia entre la articulación del brazo con la articulación del eslabón

d: Tamaño del cazo desde la articulación hasta las mandíbulas

## **1.2. MÁQUINAS Y MECANISMOS**

Las máquinas son aparatos diseñados para alterar, transferir y dirigir fuerzas con el fin de alcanzar un objetivo concreto. Dentro del ámbito de una máquina, el término "mecanismo" hace referencia a una parte física que tiene como objetivo principal la transmisión de movimiento y potencia desde una fuente de energía específica hacia un punto de salida designado. Normalmente, estos mecanismos constan de componentes conectados y dispuestos rígidamente, que trabajan juntos para producir el movimiento necesario en la máquina (Myszka et al., n.d.).

### **1.2.1. CINEMÁTICA**

Básicamente, la cinemática estudia del movimiento de los cuerpos, es decir, se centra en describir su geometría sin profundizar en las causas que lo originan. Este enfoque se basa en representar la posición, velocidad, rapidez y aceleración de un mecanismo a través de fórmulas analíticas. Este campo de la física se enfoca en la obtención de fuerzas involucradas, centrándose en la trayectoria y las relaciones geométricas asociadas al desplazamiento de los objetos a lo largo del tiempo. Normalmente, los mecanismos mueven sus partes en planos paralelos (Edward Shigley, n.d.).

### **1.2.2. ESLABONES**

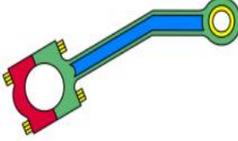
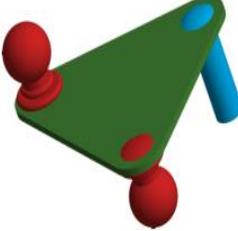
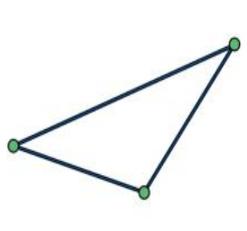
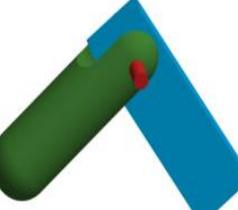
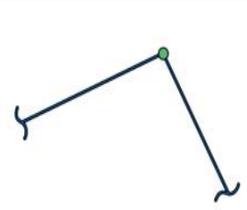
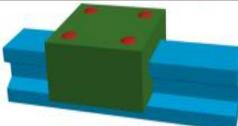
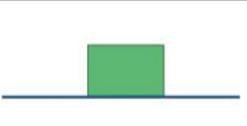
Los eslabones son cuerpos rígidos que transmiten movimiento y fuerzas al estar conectados entre sí. Un cuerpo rígido verdadero no se deforma en movimiento, y los eslabones de los mecanismos se diseñan suponiéndolos rígidos. En ese aspecto se indica que los eslabones pueden ser cadenas abiertas o cerradas. En una cadena cinemática cerrada, se presentan varios tipos de eslabones al estar conectados cada uno a dos o más eslabones (Richard G. Budynas, 2008).

- Eslabón simple: Es un cuerpo sólido con solamente dos puntos de conexión para enlazarse con otros eslabones.
- Eslabón complejo: Cuerpo sólido que posee más de dos puntos de conexión.
- Unión: Posibilita el movimiento relativo entre los eslabones.
- Punto de interés: Área específica en un eslabón donde el movimiento es de particular importancia.
- Actuador: Componente que genera la fuerza o movimiento en el mecanismo.

### **1.2.3. DIAGRAMAS CINEMÁTICOS**

Desde una perspectiva muy general, el movimiento de una máquina a menudo resulta difícil visualizar cómo se mueven los componentes al observar el dibujo completo del conjunto. Por eso, es mejor representar las partes de forma esquemática enfocándose en las dimensiones importantes para el movimiento. Estos esquemas desmontados se llaman diagramas cinemáticos. Estos diagramas deben tener una escala proporcional respecto al mecanismo real

y numerar los eslabones empezando desde la bancada. Las uniones se identifican por letras para evitar confusiones (Alfonso Pámanes & Pérez P, 2011).

Componente	Forma común	Representación cinemática
Eslabón simple		
Eslabón simple (con un punto de interés)		
Eslabón complejo		
Unión de perno		
Unión de corredera		

**Figura 1.9** Representación de diagramas cinemáticos  
Obtenido de: (SOLUCIONES ZENER, 2021)

En la figura 1.9 se muestra la forma real de componentes individuales o ensamblados, mismos que se encuentran sujetos a movimiento, junto a ello su representación teórica, es decir, su cinemática.

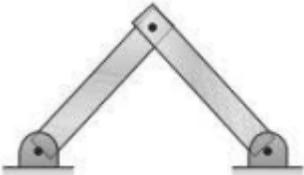
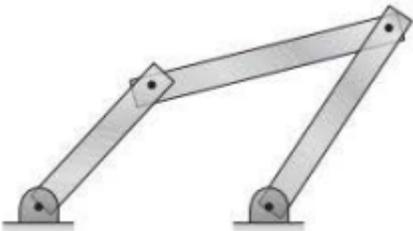
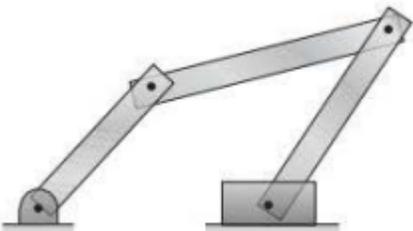
#### 1.2.4. GRADOS DE LIBERTAD

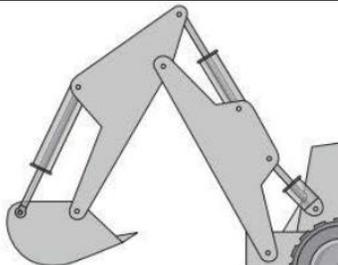
Es fundamental tener en cuenta que, para poder examinar detalladamente el funcionamiento de una máquina, es imprescindible tener un conocimiento profundo sobre la cantidad de grados de libertad que están presentes en cada parte del sistema que la integra.

En esta perspectiva, el grado de libertad se describe como la cantidad de variables de entrada que se necesitan de manera independiente para colocar con exactitud cada una de las partes de un sistema mecánico con relación al suelo. Además, se puede interpretar como la cantidad de dispositivos que se requieren para controlar el sistema, abarcando desde la manipulación manual de una pieza móvil hasta la instalación de un motor en un componente o el movimiento de un pistón o émbolo en un sistema que utiliza energía hidráulica. El número de grados de libertad de un mecanismo es conocido como movilidad y se simboliza como "M". Este concepto es crucial para comprender el movimiento de sistemas mecánicos. En principio para poder analizar el mecanismo de una máquina torna necesario conocer el número de los grados de libertad de todo el sistema que lo compone (Myszka et al., 2012).

En la tabla 1.1 en el apartado grados de libertad, se muestra la cantidad de grados de libertad que posee el mecanismo, seguido de su forma de representación y además una serie de aplicaciones de uso mecánico dentro del ámbito automotriz.

**Tabla 1.1** Ejemplos de grados de libertad

Grados de libertad	Forma	Aplicación
<b>M = 0</b>		Bases de motor con pasador.
<b>M = 1</b>		Recorrido del asiento hacia delante y hacia atrás, apertura y cierre de las puertas, capó, sistema de distribución.
<b>M = 2</b>		Gata mecánica de tijera.

<p><b>Varios grados de libertad</b></p>		<p>Retroexcavadora, brazos robóticos,</p>
---	--	---

Fuente: (Myszka et al., 2012)

#### 1.2.4.1. Ecuación de Gruebler.

En resumen, los GDL para eslabones articulados por uniones comunes se evalúan utilizando la ecuación de Gruebler como se muestra a continuación:

#### Ecuación 1.3 Grados de libertad

$$M = 3(n - 1) - 2j_p - j_h \quad [1.3]$$

Donde:

$M$ : grados de libertad

$n$ : número total de eslabones del mecanismo

$j_p$ : número total de uniones principales

$j_h$ : número total de articulaciones de orden superior

### 1.3. SELECCIÓN DE MATERIALES

Inicialmente para poder generar una correcta selección de materiales, se debe regir un criterio de selección con pasos ordenados, es decir, dentro del proceso de diseño de una máquina, la decisión sobre qué materiales utilizar para los diferentes elementos o componentes es una etapa crítica. La elección del material para cada pieza debe cumplir con los requisitos específicos de la función que se le asigne. Esta selección se encuentra fuertemente vinculada con las características físicas y mecánicas del material, tales como su densidad, propiedades térmicas, propiedades eléctricas, resistencia mecánica y rigidez, entre otras. Aunque pueda elevar sus costos puede influir positivamente en la eficiencia y rendimiento general del conjunto mecánico (Norton, 2009).

### **1.3.1. MATERIALES EN EL DISEÑO DE MÁQUINAS**

Desde el punto de vista ingenieril existe una amplia variedad de materiales que son categorizados en base a diferentes criterios como su composición química, estado físico, estructura, fases, impurezas y distribución de componentes. Además de estas funciones, se consideran cualidades como resistencia, protección, estética e interacción con el usuario. Estos aspectos juegan un papel importante en la selección de materiales para garantizar un modelo eficiente y funcional de la máquina (Norton, 2009).

Dentro del proceso de diseño de máquinas, se da una importancia considerable a los materiales sólidos, ya que desempeñan un papel crucial al proveer soporte estructural al resistir tensiones y deformaciones controladas, así como al facilitar funciones de guía como el deslizamiento y la adhesión (Ashby et al., 2005).

#### **1.3.1.1. Propiedades Físicas**

En el diseño de máquinas, la elección de materiales se ve influenciada por propiedades físicas clave como: densidad, propiedades térmicas, eléctricas y magnéticas. Estas propiedades son cruciales en la determinación del rendimiento y la funcionalidad de los componentes de la máquina, así como en su interacción con el entorno y otros sistemas (ASM International. Handbook Committee., 2006).

#### **1.3.1.2. Propiedades Mecánicas**

Se han establecido ensayos estandarizados para analizar propiedades mecánicas de materiales, clasificados en rotura y superficiales. Estos ensayos proporcionan información crucial para entender cómo los materiales se comportan bajo diferentes condiciones de carga y entorno, ayudando así en la selección adecuada de materiales para las aplicaciones específica (Lee The Timken Co et al., 1998)

- **Curva Esfuerzo – Deformación:** La relación entre esfuerzo y deformación de un material es estrecha, ya que al examinar esta conexión se puede comprender el comportamiento mecánico del material en términos de la fuerza que puede resistir mientras se deforma antes de fracturarse. Para comprender esto, es necesario analizar los conceptos individuales de esfuerzo y deformación. El esfuerzo es la fuerza aplicada por unidad de área en un material, misma que se representa por la siguiente fórmula:

### Ecuación 1.4 Esfuerzo

$$\theta = \frac{P}{A} \quad [1.4]$$

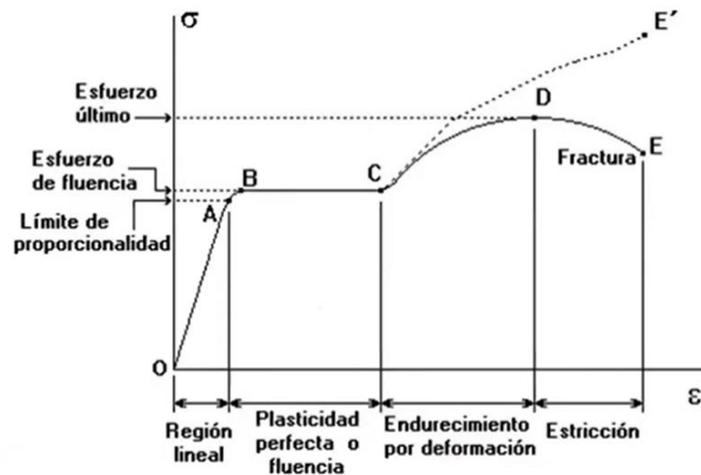
Donde:

$\theta$ : Esfuerzo

P: Fuerza axial

A: Área de la sección transversal

Por otro lado, la deformación se refiere al cambio, ya sea este permanente o temporal, en la estructura física de un cuerpo debido a las tensiones generadas por las fuerzas aplicadas. Las unidades utilizadas para expresar la deformación pueden ser en milímetros por milímetro (mm/mm) o en porcentaje (%).



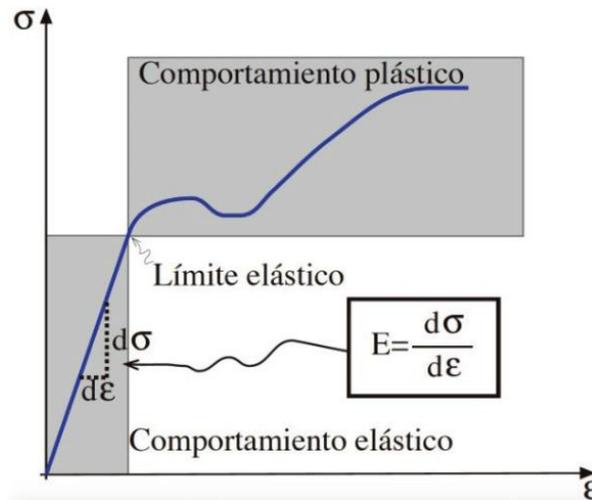
**Figura 1.10** Curva esfuerzo – deformación

Obtenido de: (Beer et al., n.d.)

La curva característica del diagrama esfuerzo – deformación depende del material puesto a experimento. Sin embargo, el más común y aplicado es el de materiales dúctiles sometidos a tensión, como se muestra en la figura 1.10 donde se aprecia los criterios más relevantes tales como: de límite de fluencia, región plástica e índice de fractura.

- Comportamiento plástico: Capacidad de un material para experimentar una deformación permanente sin fracturarse cuando se somete a una carga mecánica que excede su límite elástico.
- Comportamiento elástico: La capacidad de un material para deformarse

momentáneamente y luego regresar a su forma original. Este comportamiento es común en materiales como el acero y el caucho.



**Figura 1.11** Representación teórica del módulo de Young  
Obtenido de: (Porras & Arias-Trujillo, 2016)

La propiedad de un material de mantener su forma sin deformarse cuando se expone a tensiones o compresiones longitudinales se define como módulo de elasticidad, identificado por la letra "E" como se muestra en la figura 1.11 es decir, la relación de un material al ser sometido a una fuerza está definida como la proporción entre la fuerza aplicada y la deformación que se genera en la dirección de la fuerza, pero esto es válido únicamente si la deformación no excede los límites elásticos del material.

### 1.3.2. METALES Y ACEROS

Los materiales metálicos, especialmente los férricos tienen cierta cualidad significativa que los hacen mucho más relevantes del resto de metales, estas cualidades son imprescindibles dentro del proceso de diseño y fabricación de máquinas por sus características, entre las más destacadas son las siguientes:

- Óptimas propiedades mecánicas: Poseen una resistencia y rigidez superiores en comparación con polímeros, y una tenacidad superior en comparación con cerámicas.
- Buena conductividad eléctrica y térmica: Exhiben una buena capacidad para conducir electricidad y calor.
- Óptimas características para el conformado: Son especialmente adecuados para procesos de conformado, en particular para la deformación plástica.

- Modificación de propiedades mecánicas: Se pueden cambiar las propiedades mecánicas con deformación en frío o tratamientos térmicos.

### 1.3.2.1. Materiales Férricos

Dentro de los materiales metálicos se encuentran los aceros, que destacan por sus excelentes propiedades mecánicas. También se incluyen las fundiciones, que son fáciles de moldear y tienen un costo moderado, pero son densas y susceptibles a la corrosión. Además, hay que considerar los aceros inoxidables, los cuales exhiben resistencia a la corrosión, aunque por lo general se caracterizan por presentar un costo superior.

### 1.3.2.2. Acero de Fabricación para Maquinaria

Este tipo específico de acero se crea principalmente para fabricar componentes que desempeñan funciones críticas a la hora de guiar o transmitir las partes móviles de la maquinaria.

Además, se requiere este proceso para la creación de piezas que son componentes de conexiones dentro de dispositivos mecánicos, tales como rodamientos, guías deslizantes, guías lineales, engranajes y excéntricas. Estos aceros poseen altas propiedades superficiales, como dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga superficial, junto con una tenacidad de núcleo sólido para resistir impactos y vibraciones de manera efectiva. Estos incluyen tipos de aceros tales como los aceros de cementación y los aceros de nitruración (ASM International. Handbook Committee., 2006).

El diseño de un producto debe considerar siempre una serie de restricciones para asegurar que sea aceptado tanto a nivel nacional como internacional. Para cumplir con esta necesidad, se establecen normativas que regulan diversos aspectos del diseño y desarrollo del producto, garantizando así su control y cumplimiento, dicho de esa manera en la tabla 1.2 se muestra el acero utilizado para la fabricación de distintas piezas y elementos mecánicos.

**Tabla 1.2** Aceros comunes en maquinaria pesada

Material	Densidad (g/cc)	Resistencia máxima de tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson
<b>AISI 4140</b>	7,85	1020	205	0,29
<b>AISI 4140 recocido</b>	7,85	655	205	0,29
<b>AISI 9840 templado</b>	7,87	1240	200	0,29

<b>AISI 8620 recocido</b>	7,85	530	205	0,29
<b>Acero con alto contenido de carbón</b>	8,26	3200	235	0,28

Fuente: (MatWeb, 2024)

## 1.4. HERRAMIENTAS CAD/CAE

Desde un punto de vista general las herramientas CAD/CAE han evolucionado de una manera Impresionante, hoy en día existe una infinidad de programas de modelado CAD en su mayoría con versiones académicas y por otro lado la simulación CAE que de la misma manera hay programas de paga y otra versión estudiantil. Sin embargo, el uso de estas herramientas computacionales requiere de una preparación previa antes de uso, en ambos casos se requiere capacitación técnica antes de hacer uso de ellas.

### 1.4.1. DISEÑO CAD

El software CAD específicamente SolidWorks es un programa que ayuda a los diseñadores a esquematizar ideas, experimentar y producir modelos detallados (SolidWorks, 2023).

Evidentemente la interacción usuario – software es muy amigable gracias a su interfaz que es sencilla de entender, inicialmente se debe realizar un boceto en 2 dimensiones para que luego de ello, el mismo pueda ser convertido en un diseño 3D, es decir, que contenga largo, ancho y espesor, con ello se obtiene grandes ventajas como la optimización de recursos, tiempo y aumento de eficiencia en los trabajos.

En esta perspectiva se menciona que SolidWorks aparte de generar objetos tridimensionales también tiene la capacidad de realizar procesos de ensamble, es decir, el software puede acoplar o unir dos o más piezas las cuales fueron modeladas individualmente, esto como una función más que ofrece el programa (SolidWorks, 2023).

Además, el software tiene una gran ventaja de poder exportar sus formatos Stp hacia otros softwares, eso y entre otras características que se mencionan en la tabla 1.3 de esta manera se realiza un análisis de los diferentes programas de modelado que existen según la necesidad del diseñador.

**Tabla 1.3 Herramientas CAD y sus ventajas**

<b>Características</b>	<b>SolidWorks</b>	<b>AutoCAD</b>	<b>Inventor</b>
<b>Curva de aprendizaje</b>	Se menciona que con un entrenamiento de 80 horas teórico-practico es posible sostener su interacción.	Para adquirir una buena habilidad toma de 100 a 200 horas.	Para ello torna la necesidad de capacitación de por lo menos 90horas.
<b>Versión estudiantil</b>	Totalmente disponible	Amplia disponibilidad para diseñadores, arquitectos.	Pagado, con un plan de autodesk Education
<b>Número de elementos</b>	110K nodos y elementos	90K nodos y elementos	150K nodos y elementos
<b>Interfaz</b>	Enfoque relacionado a la ingeniería	Relación con diseñadores	Enfoque relacionado con la arquitectura

Fuente:(SolidWorks, 2011)

#### 1.4.2. ANÁLISIS FEM

El método de los elementos finitos o (FEM) por sus siglas en inglés, básicamente permite simular el trabajo operativo de cualquier pieza, elemento, o sistema al que se encuentra sometido, este método ayuda a prever un riesgo de fractura, desgaste, en general de cualquier comportamiento físico que se vea afectado en elemento (Debem, n.d.).

En ese sentido, ANSYS hace uso del Método de los Elementos Finitos mismo que es un modelo computarizado para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales muy utilizada para la resolución de problemas de ingeniería (Palma, 2022).

Durante las últimas décadas este método ha ido evolucionando con la finalidad de ofrecer mayores prestaciones al usuario que lo utiliza, así mismo a las grandes empresas que se dedican a la fabricación de mecanismos, piezas y autopartes.

En ese sentido, en la tabla 1.4 se muestra un conjunto de herramientas de simulación CAE donde se resaltan las características más importantes entre ellas aplicaciones de tipo estudiantil, como también las de tipo industrial.

**Tabla 1.4** Herramientas CAE y sus ventajas

<b>Características</b>	<b>LS Dyna</b>	<b>Ansys</b>	<b>Kratos</b>
<b>Curva de aprendizaje</b>	Amplia capacitación para su dominio.	Capacitación entre 40 – 50 horas teórico practico.	Amplia capacitación para su dominio
<b>Versión estudiantil</b>	Tiene problemas de instalación	Accesible a toda la comunidad estudiantil.	No existe una versión estudiantil
<b>Número de elementos</b>	Entre 150K nodos y elementos	Numero límite de nodos y elementos 128K.	200K nodos y elementos
<b>Interfaz</b>	Amplias ventanas de trabajo	Una interfaz muy amigable con el usuario	Elevado consumo computacional

Fuente: (Ansys, 2024)

## 1.5. IMPRESIÓN 3D

### 1.5.1. TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN

Si bien es cierto la impresión 3D o manufactura aditiva es eficiente en procesos de fabricación de prototipado rápido, mediante la reducción de costo y tiempo. No obstante, la calidad de prototipado es muy limitada, eso en función de tipo de tecnología que se va a utilizar.

En ese sentido, desde hace la última década la impresión 3D ha dado un avance favorable en términos de fiabilidad, de hecho, hoy en día existen impresoras de alta resolución, con distintas soluciones en función de la necesidad del usuario para una gran variedad de aplicaciones [20]. Así que, a manera de resumen sobre las tecnologías de innovación actuales, y una comparativa de cada una de ellas.

Como se muestra en la tabla 1.5 el modelado por deposición fundida (FDM) es más asequible en términos de disponibilidad y costos en comparación con las otras técnicas de fabricación aditiva, puesto que la necesidad del trabajo de titulación se basa en fabricar un prototipo de molde, además de que la capacidad volumétrica del método seleccionado es óptima para obtener el prototipo.

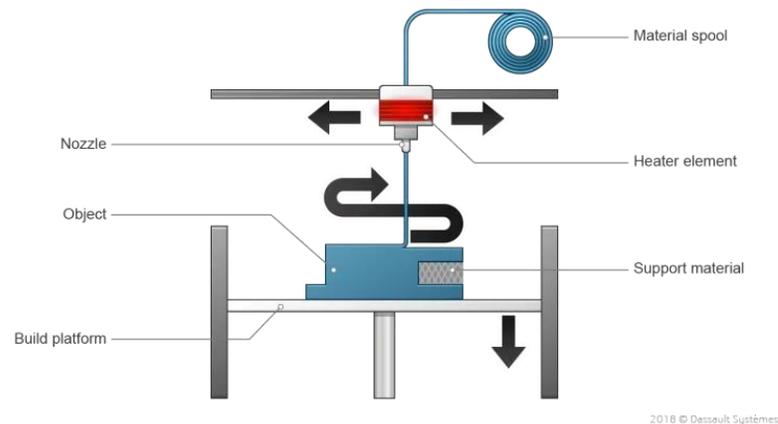
**Tabla 1.5** Modos de impresión 3D

<b>Características</b>	<b>Modelado por deposición fundida (FDM)</b>	<b>Estereolitografía (SLA)</b>	<b>Sinterizado selectivo por láser (SLS)</b>
<b>Curva de aprendizaje</b>	Rápido y fácil para Piezas sencillas	Fácil para elementos pequeños	Alta complejidad de aprendizaje
<b>Entorno de instalación</b>	Ventilación a carga media	Una máquina de escritorio	Necesario un entorno de taller
<b>Volumen de impresión</b>	300 * 300 * 600 mm	300 * 335 * 200 mm	165 * 165 * 300 mm
<b>Disponibilidad</b>	Sencilla de realizar la adquisición	Media en generar su adquisición	Difícil adquisición debido a su precio
<b>Costo del material</b>	55 – 150 \$/Kg	155 – 205 \$/l	105 \$/Kg de nylon
<b>Aplicación</b>	Prototipado rápido	Aplicaciones dentales	Prototipos funcionales

Fuente: (Formlabs, 2024)

### 1.5.2. MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

La descripción mencionada corresponde a la técnica de Fabricación por Deposición de Material Fundido (FDM, por sus siglas en inglés). En esta técnica, un filamento de plástico o metal se deposita sucesivamente a través de una boquilla de extrusión. Esta boquilla sigue el trazado definido por el archivo CAD y calienta el filamento a más de 185 °C, fundiendo el material mientras se imprime. El material se deposita en capas muy finas, generalmente con un grosor promedio de 0,04 mm. De esta manera, el objeto se construye capa por capa, desde la base hasta la parte superior. Los materiales más usados en FDM son termoplásticos como el ABS o el PLA. Es una tecnología utilizada por una amplia variedad de impresoras 3D. La calidad de la impresión, el coste y la disponibilidad de materiales varían considerablemente según el tipo de máquina. Con la FDM, hay una amplia gama de materiales disponibles. Los plásticos como el ABS o el PLA son los más comunes, y se pueden encontrar en rojo, amarillo, verde, azul, gris, blanco y negro, entre otros (Berchon & Luyt, 2014).



**Figura 1.12** Proceso FDM  
Obtenido de: (Berchon & Luyt, 2014)

Si bien es cierto, actualmente existen distintos métodos de fabricación aditiva. Sin embargo, bajo los términos de disponibilidad y uso de recursos, el proceso FDM es el más asequible a nivel local ya que la cantidad de piezas, componentes y ensamblaje que conforma la máquina es mínimo, como se muestra en la figura 1.12 además que su modo de operación es fácil y eficiente.

### 1.5.3. CADENA DE OPERACIONES EN LOS PROCESOS FA

El proceso inicia con la creación de un modelo CAD del objeto que se desea fabricar. Luego, este modelo se exporta en un formato compatible con la impresora 3D, generalmente en formato STL. El archivo exportado se envía al software de la impresora, donde se define un espacio de trabajo virtual y se posiciona el modelo en coordenadas para su construcción. Una vez aplicadas las condiciones necesarias, la impresora 3D procede a fabricar el objeto (Morales, n.d.).

#### 1.5.3.1. Modelado 3D.

Actualmente, existen varios softwares de modelado 3D cada uno se especializa en un área específica que va de la mano según la necesidad, entre ellos se puede destacar: AutoCAD, CATIA, SolidWorks.

En ese sentido se menciona que los archivos que se utilizan principalmente para imprimir se encuentran formados por un conjunto de vértices, aristas y superficies, de hecho, cuando mayores son los triángulos o polígonos el elemento tendrá menos detalles y su forma se verá más limpia.

### 1.5.3.2. Exportación al Formato de Impresión.

Hoy en día el formato más usado para la exportación de archivos es el STL, básicamente lo que hace este formato es generar un mosaico de triángulos unidos por aristas. Sin embargo, dicha extensión contiene ciertas limitaciones como es el caso de que solamente se puede mantener la geometría del modelo, es decir, no es posible contemplar su textura ni el color.

Por otro lado, la extensión AMF por sus siglas en inglés (Additive manufacturing file format) es otra opción que o alternativa al formato STL, de hecho, la ventaja principal de la extensión AMF es que, si se puede contemplar la información de color, material y demás variables que son importantes al momento de llevarlo al software de impresión, sumado a que el archivo en formato AMF es mucho más liviano que el archivo STL (Ben Redwood, 2017)

### 1.5.3.3. Generación de Código G

Básicamente el Código G o (G- Code) por sus siglas en inglés, es a interfaz usuario - software, es decir, es la manera en que el usuario genera instrucciones para que la maquina pueda entender. Según el software usado, a veces es necesario seleccionar el espesor de la capa. Este parámetro es importante y afecta la calidad de la superficie del elemento, de hecho, una capa más fina mejora la calidad, pero aumenta el tiempo de fabricación.

En lo esencial, es crucial entender si es más importante la estética o una impresión rápida y barata, las diferencias en piezas idénticas con alturas de capa de 100". Sin embargo, es difícil distinguir entre 200 y 100 micras, pero la de 100 tarda imprimirse y costará más. (Programa de la unión europea, 2017)

```
G05.1 X 0.000 Y 0.000 Z0.500 A 0.000 B 0.000 C -90.000
G05.1 X 0.353 Y 0.000 Z0.353 A-44.753 B 5.295 C -84.681
G05.1 X 0.339 Y 0.099 Z0.353 A-44.007 B10.545 C -62.907
G05.1 X 0.297 Y 0.191 Z0.353 A-42.734 B15.699 C -40.947
G05.1 X 0.231 Y 0.267 Z0.353 A-40.893 B20.704 C -18.701
G05.1 X 0.146 Y 0.321 Z0.353 A-38.426 B25.496 C 3.938
G05.1 X 0.050 Y 0.349 Z0.353 A-35.264 B29.999 C 27.082
G05.1 X-0.050 Y 0.349 Z0.353 A-31.331 B34.123 C 50.842
G05.1 X-0.146 Y 0.321 Z0.353 A-26.565 B37.761 C 75.313
G05.1 X-0.231 Y 0.267 Z0.353 A-20.941 B40.789 C 100.547
G05.1 X-0.297 Y 0.191 Z0.353 A-14.510 B43.079 C 126.519
G05.1 X-0.339 Y 0.099 Z0.353 A -7.436 B44.511 C 153.089
G05.1 X-0.353 Y 0.000 Z0.353 A 0.000 B44.999 C 179.999
G05.1 X-0.339 Y-0.099 Z0.353 A 7.436 B44.511 C-153.089
```

**Figura 1.13** Generación de código G

Obtenido de: (Mora & Morales, 2018)

Desde un punto de vista general la metodología CAM hace referencia al tipo manufactura a base de un ordenador, pero para que el computador entienda los requerimientos del operador, se debe comunicar bajo una generación de código G, es decir, un lenguaje de programación que contiene un conjunto de números y letras como se muestra en la figura 1.13 basadas en posición y desplazamiento en ejes de coordenadas de tipo tridimensional.

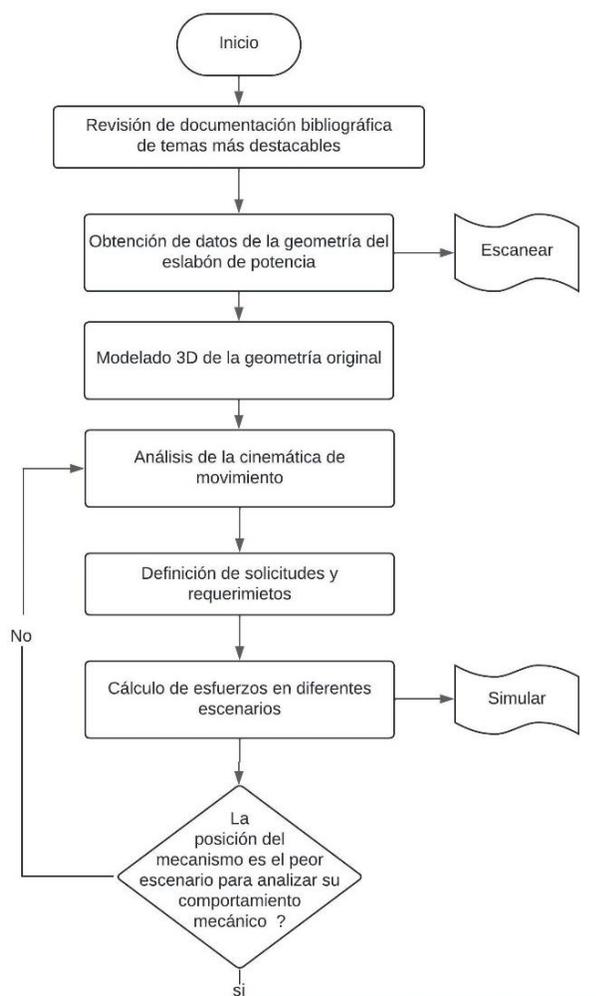
## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

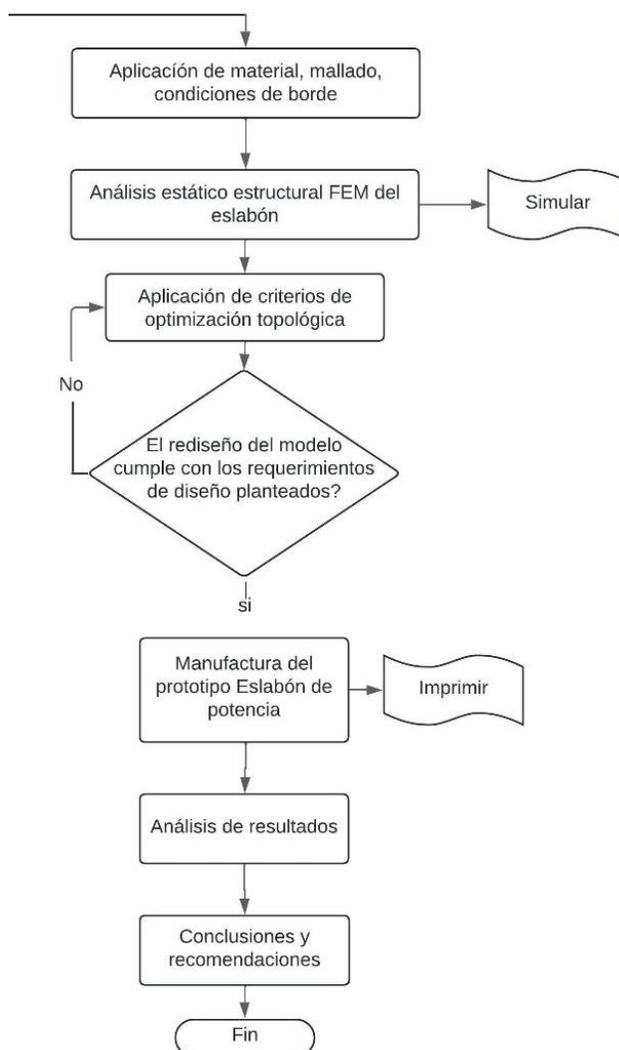
#### 2.1. METODOLOGÍA

Este texto trata de una serie de procesos lógicos para abordar el apartado de la metodología, el mismo se encuentra estructurado ordenadamente en función a los objetivos específicos que presenta el trabajo de titulación.

En ese sentido, la figura 2.1 se muestra una secuencia ordenada para llevar a cabo el rediseño y manufactura de una autoparte mediante ingeniería inversa, instrumentos CAD/CAE y manufactura aditiva.



**Figura 2.1** Flujograma general del proyecto



**Figura 2.1** Flujograma general del proyecto (Continuación...)

## 2.2. REVISIÓN DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Si bien es cierto, la retroexcavadora es un tipo de equipo de maquinaria pesada, donde principalmente se caracteriza por su amplia aplicación laboral, alto nivel de eficiencia y fiabilidad, además de que cumple su versatilidad en diferentes condiciones ambientales sin verse afectada. Dentro de sus aplicaciones se encuentra utilizada en obras civiles, construcción de infraestructuras, transporte de material, y agricultura (Yu et al., 2021).

Sin embargo, la alta contribución de esfuerzos aplicados en cada uno de los eslabones y articulaciones presenta un gran reto para quienes se encuentran en la constante innovación de la industria automotriz con el fin de satisfacer verdaderas condiciones de trabajo.

El análisis bibliográfico fue llevado a cabo a través de la revisión de documentación en diferentes artículos científicos que describe una falla recurrente en el brazo de la retroexcavadora indistintamente del uso de la maquina existente, esta falla o índices de fallas en una pieza en específico “eslabones”

### **2.2.1. COMPORTAMIENTO MECÁNICO**

Visto que la retroexcavadora es un mecanismo muy robusto con un alto índice de peso, para soportar fuertes condiciones de trabajo, sumado a esto variables externas tales como fuerzas de inercia y gravedad denota un modelo FEM que requiera un alto índice de trabajo computacional. En este texto se abordarán las cargas, tensiones, que actúen sobre el eslabón de potencia donde más se produce la mayor concentración de esfuerzos generados, como indicadores de trabajo en condiciones reales.

Desde una perspectiva general, la base de empotramiento se genera en la estructura de sujeción de la pluma mismo que es accionado por un cilindro hidráulico, de allí se obtiene las fuerzas de empuje y excavación, ahora bien, se menciona que se debe tomar las medidas de longitud de cada uno de los eslabones que conforma el mecanismo, es decir, pluma, brazo, laterales, cucharón para tratarlo como un mecanismo articulado de 4 barras y poder obtener las fuerzas que actúan, para aplicarlo a un sistema mecánico estático (Yu et al., 2021).

#### **2.2.1.1. Registro de las Tensiones Máximas de la Retroexcavadora**

La tensión máxima se produce en la región donde se acopla el sellado interior y exterior, especialmente en las regiones de soldadura entre placas y áreas con grandes cambios de estructura geométrica. Esto también se llama concentración de tensiones, que puede deberse a varias razones, como el cambio repentino de la estructura topológica, la conexión irregular de componentes y un proceso de fabricación irrazonable, la concentración de tensiones es la principal razón del fallo.

Por lo tanto, es necesario y significativo implementar la optimización de la estructura para reducir o evitar el daño de la concentración de tensiones en los diferentes eslabones que está conformado el mecanismo.

### **2.2.2. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL**

Desde una perspectiva muy general, para mejorar la capacidad de carga del brazo mecánico se realizan procesos de optimización estructural y también de tipo topológico, en las piezas o

componentes principales que conforma el mecanismo donde se muestran evidentemente las fallas, aberturas o fisuras.

En ese sentido, la concentración de tensiones se genera en las áreas de soldadura y flexión, básicamente lo que realiza la optimización estructural es un cambio de su composición geométrica, dichos cambios son mínimos en términos de geometría (Yu et al., 2021).

Prácticamente para mejorar la rigidez y disminuir la concentración de tensiones se usan placas de acero con un nivel de grosor significativo, es decir, con un rango entre 5 a 16 mm, hay que mencionar que la aplicación de dicho material varía según la disponibilidad y coste a nivel local, para que la optimización sea más eficiente, los cambios que presente el nuevo modelo deben ser simulado nuevamente para validar la nueva configuración del mecanismo.

### **2.3. OBTENCIÓN DE DATOS Y MODELIZACIÓN DEL ESLABÓN H**

En primer lugar, se realiza una recopilación de datos y particularidad del elemento original como objeto de estudio. Se realizará un estudio minucioso donde se abordarán temas como dimensiones, forma, material, geometría para justificar la incidencia en su rediseño, además de cumplir con la aplicación de ingeniería inversa que le corresponde al trabajo de investigación. Dicho de otra manera, en este apartado se establece una obtención de datos de manera general para satisfacer los requerimientos y solicitudes del mecanismo.

#### **2.3.1. ESCANER EINSTAR 3D**

El escáner Einstar 3D básicamente es un equipo usado para realizar procesos de escaneo y obtención de un modelo digital en tres dimensiones, el mismo analiza la pieza u objeto que necesite el especialista en el tema, con el objetivo principal de obtener la mayor parte de datos, es decir, dimensiones, forma, textura y en algunos casos el color.

Bajo los requerimientos del proyecto de grado, se ha realizado la selección de dicho escáner mismo que cumple aplicaciones de tipo estudiantil y también de tipo industrial gracias a su amplia variedad características que ofrece el instrumento como se muestra en la tabla 2.1

**Tabla 2.1** Especificaciones de Einstar 3D Hand Scanner

<b>Escáner</b>	<b>Einstar 3D Hand</b>	<b>Características adicionales</b>
<b>Dimensiones</b>	Largo: 220 mm Ancho: 55 mm Espesor: 46 mm	<b>Compatibilidad de software</b> Windows 10/11(64 bits) <b>Disposición</b>
<b>Peso</b>	500 gr	Dos cámaras de profundidad y una de color
<b>Velocidad de escaneo</b>	14 Ftg/seg	<b>Fuente de luz</b>
<b>Exactitud de escaneo</b>	0,10 mm	Luz estructurada infrarrojo
<b>Alcance de escaneo</b>	434 * 379 mm	
<b>Temperatura de trabajo</b>	0-40°C	
<b>Formato de salida</b>	Stl;Obj,Asc	

Fuente: (SHINING, n.d.)

### 2.3.2. ESCANEEO 3D DEL ESLABÓN ORIGINAL

Previo al proceso de escaneo fue necesario ubicar marcadores propios del equipo que permiten al escáner ubicarse con mayor facilidad y realizar el escaneo con mayor rapidez.

Con ayuda de este instrumento video-digitalizador se pudo obtener la geometría principal del eslabón H, así que se obtuvo la altura, el ancho, circunferencias y ángulos desde diferentes tipos de vistas, de cierto modo que el modelo CAD se genere de manera más clara y precisa sin afectar el factor de diseño y disminuyendo así en menor cantidad errores, como suele suceder al momento de aplicar métodos tradicionales como es el modelaje manual.

Así mismo se ha generado una serie de pasos con orden secuencial para la obtención del diseño digital en tres dimensiones, de la siguiente manera:

- Preparación del mecanismo, separando las articulaciones para obtener una medición exacta y evitar rasgos o trazos innecesarios.
- Realización del escaneo 3D del objeto visto desde varios ángulos y vistas, con una separación entre 200 a 300mm para la obtención del sólido.



**Figura 2.2** Uso de Einstar 3D hand scan

En la figura 2.2 se muestra la colocación de marcadores en la superficie de la pieza próxima a escanear esto con el objetivo de evitar problemas de saturación y mejorar el contraste de la imagen para la obtención de datos en el software de escaneo.

### **2.3.3. DIGITALIZACIÓN Y MODELADO DEL ESLABÓN DE POTENCIA**

En segundo lugar, se modeló el elemento en un software específico que utiliza el escáner para su creación en tres dimensiones, de mismo modo que se trabajó con un programa de diseño CAD es posible generar métodos de post procesamiento y una redefinición del modelo para obtener un diseño más real generado con herramientas digitales.

En ese sentido, se hizo uso del software EXstar para el modelamiento digital, con un orden secuencial, como se muestra a continuación.

- Reestructuración del modelo mediante post procesamiento para eliminar trazos, aristas que no son parte del mecanismo.
- Generación de formato Stl en software EXstar para llevarlo a un software de diseño

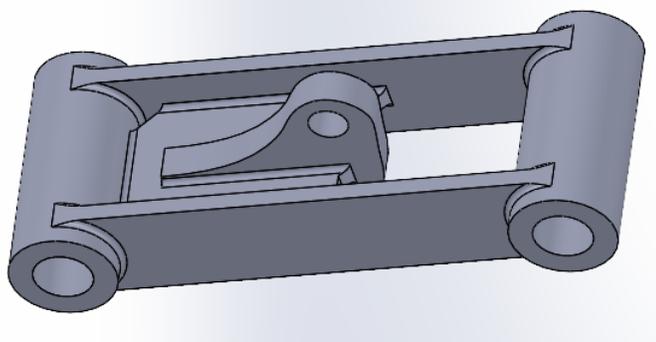


**Figura 2.3** Modelo escaneado

En la figura 2.3 se observa que el componente escaneado fue puesto a una etapa de preprocesamiento donde se eliminó todas las piezas que no corresponden al modelo deseado para posteriormente generar un mallado sobre toda la superficie

#### **2.3.4. POST PROCESAMIENTO DEL MODELO EN SOFTWARE CAD**

Continuando con el proceso de diseño en esta etapa se realizó un post procesamiento del eslabón debido a que en el proceso de escaneo existen puntos en donde el equipo tiene una difícil visualización de vistas, como también a lugares con bajo nivel de luminosidad, es decir, en las vistas posteriores, inferiores e interiores, ya que este mecanismo se encuentra ensamblado y sus articulaciones son complejas de desmontar, bajo esa acotación, se procede a realizar una retroalimentación del modelo en un software de CAD para rediseñar el elemento.



**Figura 2.4** Modelado 3D del eslabón original en base a escaneo 3D

Con ayuda del amplio acceso de herramientas que nos ofrece el Solid Works versión estudiantil se usó el archivo stl como una guía principal para rellenar, dimensionar y perfeccionar la geometría del modelo, cabe destacar que en esta etapa, el modelo no se encuentra definido con un material específico, ya que el material se lo define en función de las solicitudes y requerimiento de trabajo de la máquina, es por ello que el elemento se lo visualiza en su modo natural como se pude observar en la figura 2.4 mismo que se encuentra en su etapa final de modelado.

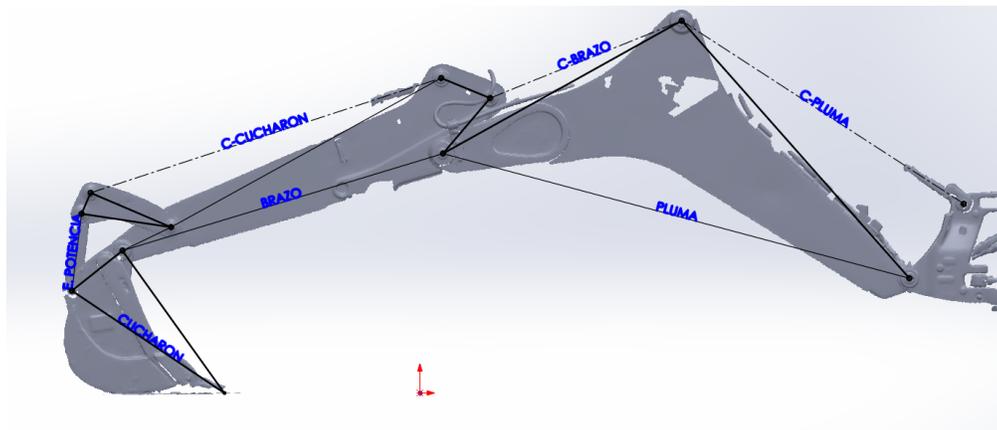
## 2.4. SIMULACIÓN CAE

Para iniciar con la configuración del modelo a simular se hizo uso del software ANSYS ya que el mismo es más confiable y versátil en la obtención de resultados.

En ese sentido, se procede a seguir una serie de etapas que requiere para que la metodología FEM tenga un orden adecuado, los mismo que se muestran a continuación

### 2.4.1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y ANÁLISIS DEL MECANISMO

En primer lugar, para analizar el comportamiento mecánico de la retroexcavadora se debe elaborar un diagrama bidimensional de todo el mecanismo.



**Figura 2.5** Escaneo 3D general del mecanismo

En este apartado, se menciona que un mecanismo se compone de más de dos eslabones articulados entre sí, dado que, para obtener los requerimientos del mecanismo, se parte de un análisis bidimensional, así que como se observa en la figura 2.5 se escaneó todo el mecanismo de la retroexcavadora CAT modelo 420E, misma que usó para elaborar el diagrama cinemático.

### 2.4.1.1. Generación del Diagrama Cinemático

Con respecto al trazado cinemático, en su proceso se ubicó la numeración de cada uno de los eslabones y pares cinemáticos existentes con indicadores alfanuméricos, mismos que se describen a continuación:

R = Junta revoluta, posee 1 GDL, permite el movimiento rotatorio

P = Junta prismática, posee 1 GDL, permite el movimiento de traslación

J1 = junta clase I, permite 1 movimiento

J2 = junta clase II, permite 2 movimientos

En ese sentido, se obtuvo los datos que sirvieron para analizar los GDL que tiene todo el mecanismo y poder realizar un análisis de fuerzas generadas, en cada eslabón, cabe destacar que en este caso no existen un par cinemático de tipo J2 por lo tanto, para calcular los grados de libertad J2 tendría un valor de 0.

N = 12 eslabones

J1 = 15 (R = 12 revolutas; P = 3 prismáticos)

J2 = 0

Con ello se calcula el número de grados de libertad GDL:

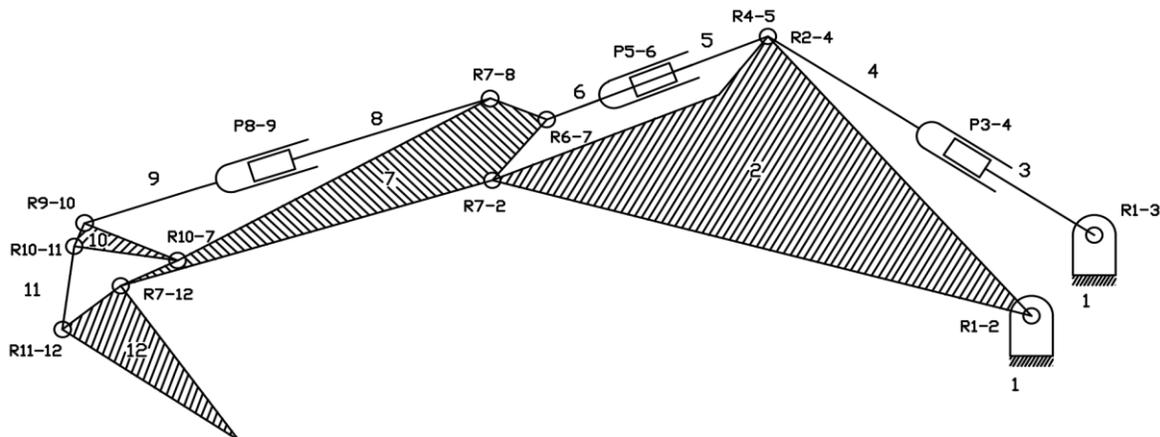
#### **Ecuación 2.1 GDL caso real**

$$\text{GDL} = 3(N-1) - 2J1 - J2 \quad [2.1]$$

$$\text{GDL} = 3(12-1) - 2(15) - 0$$

$$\text{GDL} = 3$$

Es decir, se requiere 3 actuadores para operar el mecanismo y controlar sus movimientos, en este caso corresponde a los 3 cilindros hidráulicos que posee el brazo excavador.



**Figura 2.6** Diagrama cinemático del brazo excavador

Como se muestra en la figura 2.6 la representación del diagrama cinemático del brazo articulado en dos dimensiones se resalta que existen dos tipos de bancadas, una que controla la pluma y el brazo, por otro lado, se encuentra la bancada de apoyo de los cilindros hidráulicos que controlan los tres actuadores.

#### 2.4.2. CÁLCULO DE FUERZA EN EL ESLABÓN DE POTENCIA

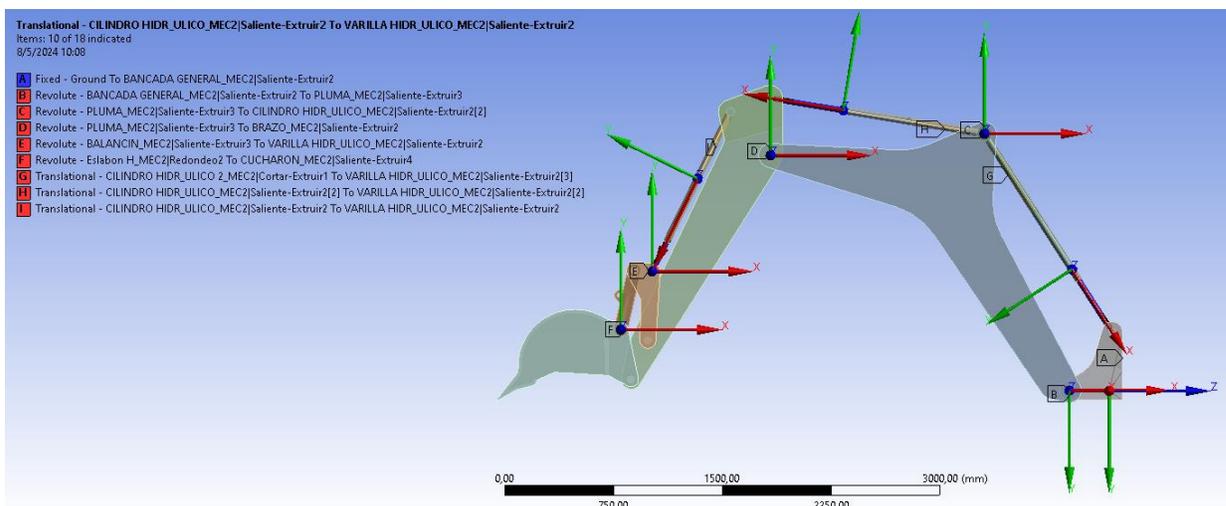
La fuerza necesaria para excavar una superficie se conoce como fuerza de excavación. Estas fuerzas se aplican en la punta del cucharón. La fuerza de giro del cucharón y la fuerza de accionamiento del brazo son dos tipos de fuerzas de excavación. La fuerza generada en el punto final del cucharón por el elemento de varillaje de cucharón se conoce como fuerza de curvatura de la cuchara, mientras que la fuerza generada en el punto final del cucharón por el actuador del brazo excavador se define como fuerza de empuje del brazo (Khedkar et al., 2022).

En este apartado para el cálculo de fuerzas se realizó un análisis en el cucharón considerando que la fuerza máxima de excavación de este elemento es ( $P=61,7$  KN) misma que fue obtenida de la ficha técnica de la máquina (Caterpillar, 2006).

En ese sentido se definió que la fuerza FH hace referencia a la fuerza actuante sobre el eslabón de potencia que se aplica en el punto de conexión entre el cucharón y dicho eslabón.

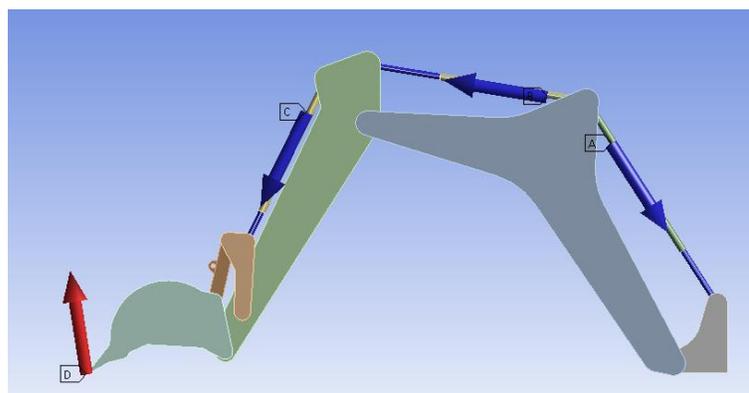
### 2.4.2.1. Validación de Simulación Cálculo

Básicamente, se llevó a cabo una simulación de movimiento de todo el brazo excavador en el módulo de Rigid Dynamics, el cual considera los cuerpos como rígidos, es decir despreciando la deformación y se enfoca en los movimientos, lo cual permite reducir el gasto computacional a fin de obtener los desplazamientos y fuerzas resultantes en el mecanismo.



**Figura 2.7** Asignación de juntas en el mecanismo

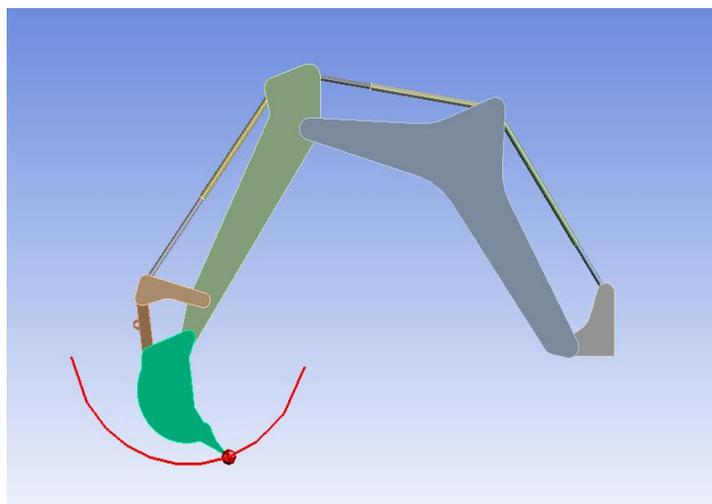
En el módulo de Rigid Dynamics se ingresó las juntas o pares cinemáticos determinados en el análisis del mecanismo, en color azul se representa la bancada puesta a tierra, y en color rojo los dos tipos de juntas ya antes mencionadas, es decir ( $R = 12$  revolutas;  $P = 3$  prismáticos) como se muestra en la figura 2.7



**Figura 2.8** Asignación de desplazamientos en el mecanismo

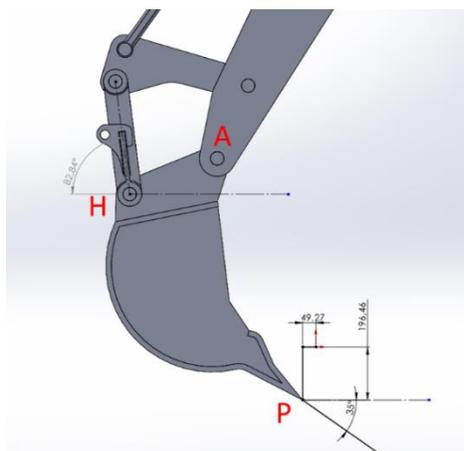
Para comprender el análisis cinemático del mecanismo y obtener datos como posiciones, desplazamientos, velocidades y aceleraciones, en las juntas tipo prismáticas que se muestran en

las flechas de color azul, se ha asignado un desplazamiento lineal en el actuador C específicamente que impulsa el eslabón de potencia H mismo que simula el trabajo del cilindro hidráulico del brazo excavador y por otro lado en la flecha de color rojo D se representa un factor de fuerza de tipo remota como se muestra en la figura 2.8 con valor que se obtuvo a través de la ficha técnica.



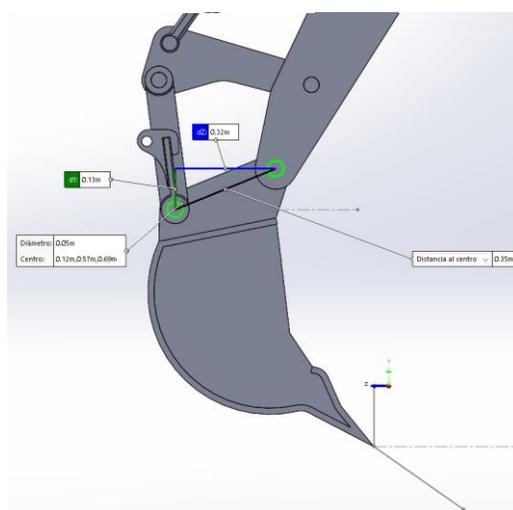
**Figura 2.9** Simulación del movimiento del cucharón

Para la validación de la simulación computacional y cálculo se tomó al azar una posición arbitraria, en este caso se tomó a los 0,7s de la simulación durante el movimiento del cucharón mostrado en la figura 2.9. En este apartado se muestran los datos necesarios tales como: posición en los ejes x,y para poder calcular la fuerza actuante en el eslabón de potencia en un instante dado.



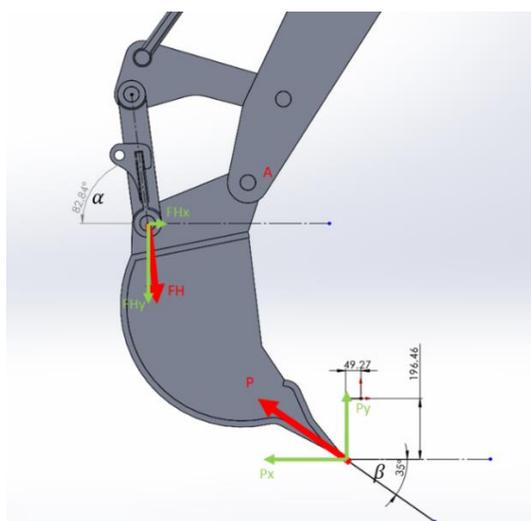
**Figura 2.10** Posición del cucharón en software CAD en 0.7 s

Dentro del software CAD se colocó el cucharón en la posición indicada en la simulación anterior para tomar en ese instante, seguido de ello se ha tomado como referencia la ubicación de los puntos A-H-P como se muestra en la figura 2.10 siendo A el punto fijo, así como las distancias entre los mismos para el posterior análisis de momentos, dicha posición se obtuvo de los resultados que arrojó la simulación en el módulo de rigid dynamics.



**Figura 2.11** Coordenadas y distancias entre puntos A-H-P

Se tomó las distancias entre los puntos A-H con respecto al punto de giro referencial, y de la misma manera entre los puntos A-P como se muestra en la figura 2.11 mediante el uso de funciones trigonométricas se procedió a realizar el cálculo, con el objetivo de encontrar el valor necesario, es decir, el FH para realizar la simulación en el módulo static estructural.



**Figura 2.12** Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón

Habiendo obtenido las distancias entre los puntos A-H-P se realizó un diagrama de cuerpo libre en los puntos  $F_H$  y P para obtener ángulos y coordenadas en el eje X y en el eje Y como se muestra en la figura 2.12 para posteriormente realizar sumatoria de momentos con respecto al punto A y poder encontrar la fuerza  $F_H$  actuante sobre el eslabón de potencia.

De este modo, para corroborar que los valores de que nos arrojó simulación sean reales se realizó la sumatoria de momentos con respecto al punto A para obtener la fuerza  $F_H$  actuante sobre el eslabón de potencia.

### Ecuación 2.2 Sumatoria de momentos arbitraria

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{Hx}(d_{Hy}) + F_{Hy}(d_{Hx}) - P_x(d_{Py}) + P_y(d_{Px}) = 0$$

$$F_H \cos \alpha (d_{Hy}) - F_H \sin \alpha (d_{Hx}) - P \cos \beta (d_{Py}) + P \sin \beta (d_{Px}) = 0$$

$$F_H = \frac{P \cos \beta (d_{Py}) - P \sin \beta (d_{Px})}{\cos \alpha (d_{Hy}) + \sin \alpha (d_{Hx})}$$

[2.2]

Los valores para la posición A son:

$$\alpha = 82,84^\circ$$

$$d_{Hx} = 0,32 \text{ m}$$

$$d_{Hy} = 0,13 \text{ m}$$

$$d_{Px} = 0,32 \text{ m}$$

$$d_{Py} = 0,89 \text{ m}$$

$$\beta = 35^\circ$$

Reemplazando los datos se determina el valor calculado de  $F_H = 100,86 \text{ KN}$

En la simulación el valor encontrado en esta posición es 100,8 KN.

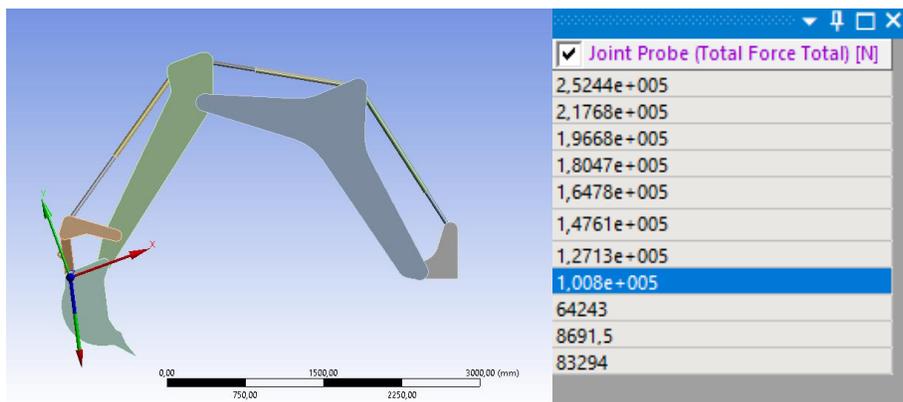


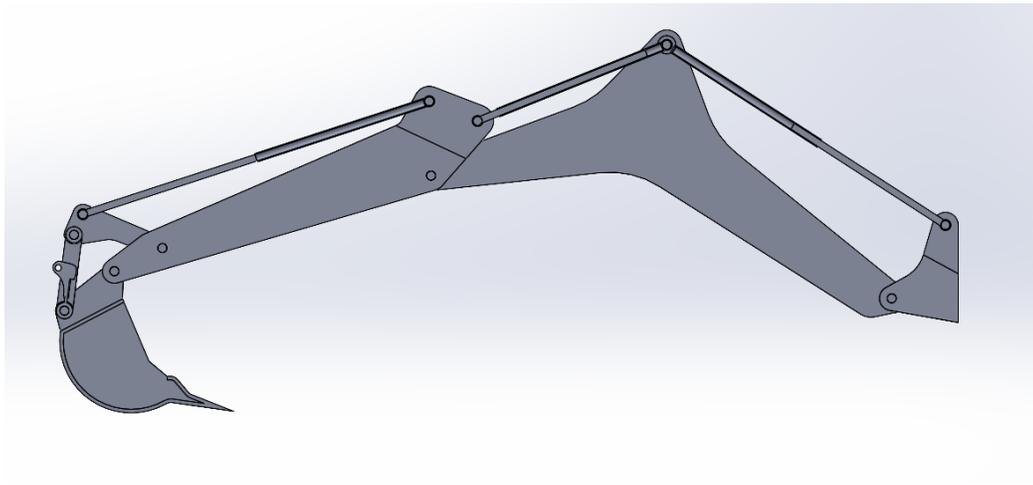
Figura 2.13 Obtención y corroboración de datos en Rigid Dynamics

Estos resultados indican que la simulación computacional y el cálculo muestran diferencias mínimas como se muestra en la figura 2.13 por lo cual es factible utilizar cualquiera de los dos métodos para encontrar el valor de aplicación de fuerza en el eslabón de potencia.

A fin de determinar el valor de fuerza  $F_H$  más elevado se consideraron dos escenarios, el primero con el brazo completamente extendido y el segundo el movimiento únicamente del cucharón en una condición habitual de trabajo para la extracción de material. A continuación, se detallan las dos posiciones con el cálculo respectivo.

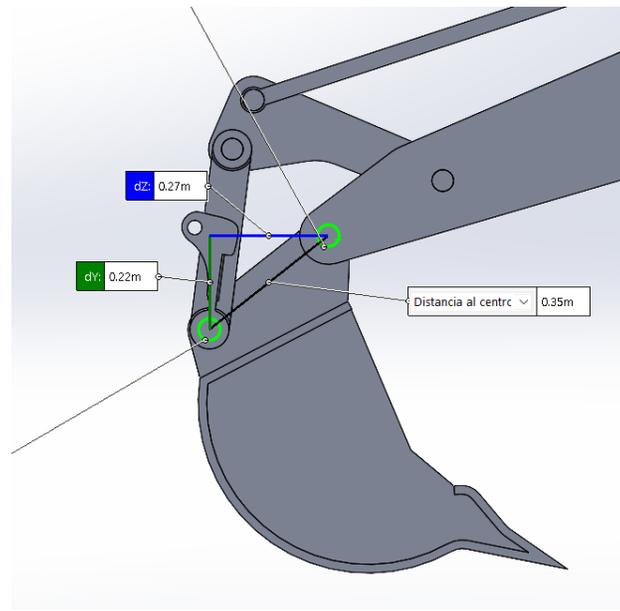
### POSICIÓN 1

Para la posición 1 se ha considerado una condición de brazo completamente extendido y movimiento del mecanismo únicamente a través del accionamiento de cilindro hidráulico de control del brazo (C-Brazo).



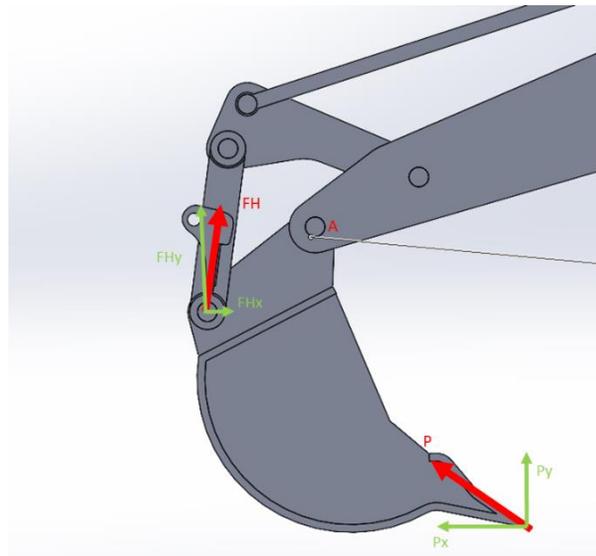
**Figura 2.14** Mecanismo en la posición 1

Bajo las numerosas posiciones de operación que tiene el brazo articulado se ha considerado dos condiciones típicas de trabajo, inicialmente se decidió colocar el mecanismo en una posición extendida, como se muestra en la figura 2.14 bajo ese criterio se ha definido una restricción de empotramiento en la pluma y en el control del cucharón, por otro lado, una con una condición de desplazamiento lineal sobre el actuador que impulsa el brazo excavador.



**Figura 2.15** Distancias entre puntos A-H-P en la posición 1

La obtención de distancias se llevó a cabo en el Software SolidWorks, teniendo en cuenta que para realizar una sumatoria de momentos se debe tener datos como fuerza y su distancia en función a un punto de referencia, de esta manera se obtuvo la distancia de 0.22 m en el eje x como se muestra en la figura 2.15 en función de la fuerza actuante  $F_h$  misma que se encuentra paralela al eslabón de potencia H con respecto al centro de giro.



**Figura 2.16** Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón en la posición 1

En la figura 2.16 se muestra la dirección de las fuerzas presentes en la posición 1, junto con un eje de coordenadas, para su posterior análisis en la sumatoria de momentos.

### Ecuación 2.3 Sumatoria de momentos posición 1

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{Hx}(d_{Hy}) - F_{Hy}(d_{Hx}) - P_x(d_{Py}) + P_y(d_{Px}) = 0$$

$$F_H \cos \alpha (d_{Hy}) - F_H \sin \alpha (d_{Hx}) - P \cos \beta (d_{Py}) + P \sin \beta (d_{Px}) = 0$$

$$F_H = \frac{P \cos \beta (d_{Py}) - P \sin \beta (d_{Px})}{\cos \alpha (d_{Hy}) - \sin \alpha (d_{Hx})} \quad [2.3]$$

Los valores para la posición 1 son:

$$\alpha = 82,54^\circ$$

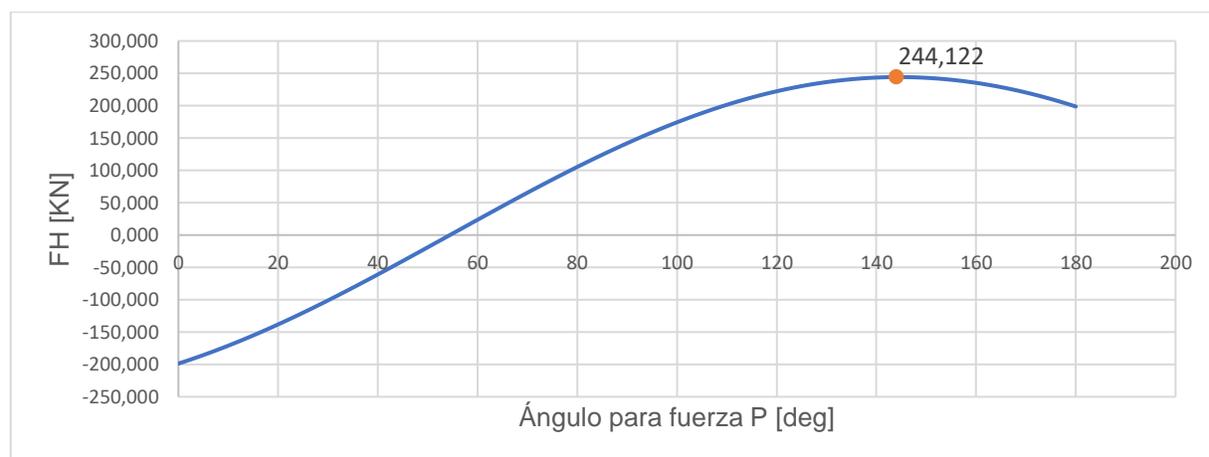
$$d_{Hx} = 0,27 \text{ m}$$

$$d_{Hy} = 0,22 \text{ m}$$

$$d_{Px} = 0,55 \text{ m}$$

$$d_{Py} = 0,77 \text{ m}$$

El ángulo  $\beta$  correspondiente a la dirección de aplicación de la fuerza P se evaluó entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  a fin de determinar el ángulo que genera el valor máximo de la fuerza  $F_H$  que se aplica en el eslabón de estudio, de esta manera se hizo un barrido general de todas las posiciones.

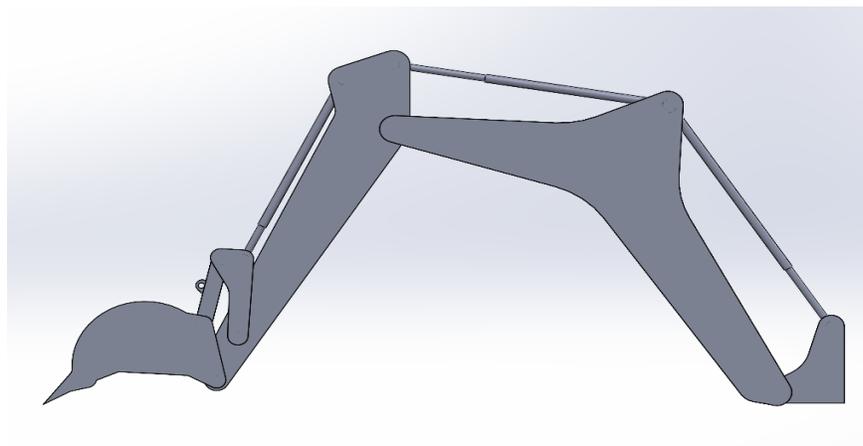


**Figura 2.17** 1 Valor de fuerza FH según la variación del ángulo  $\beta$  en la posición 1

Mediante el uso de una hoja de cálculo se ingresó la ecuación usada para analizar la fuerza máxima, en ese sentido, como se muestra en la figura 2.17 se representó FH en el eje y, por otro lado, ángulo de giro  $\beta$  en el eje x, así que se obtuvo un valor máximo de 244,122 KN con un ángulo de  $143^\circ$  aproximadamente.

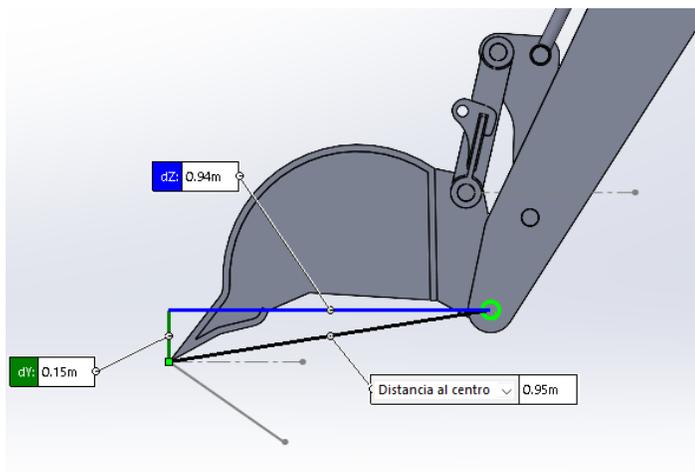
## POSICIÓN 2

Para la posición 2 se ha considerado otra condición habitual de trabajo y el movimiento únicamente del cucharón a través del accionamiento de cilindro hidráulico de control del cucharón.



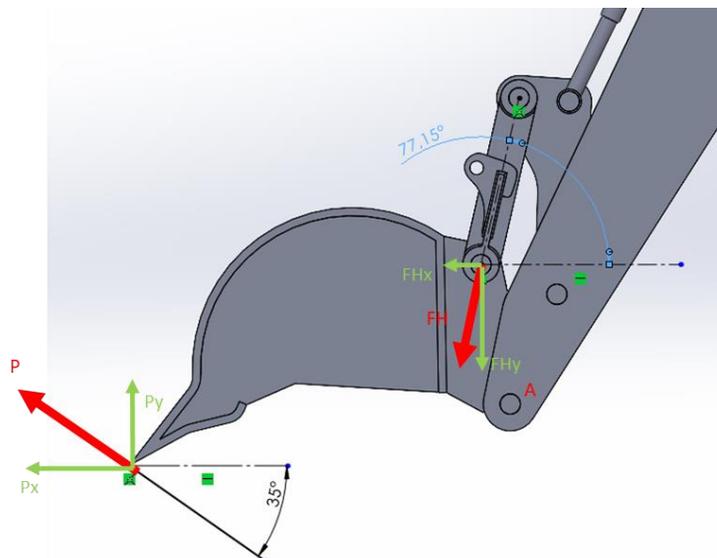
**Figura 2.18** Mecanismo en la posición 2

Como se mencionó anteriormente, existen diversas posiciones de operación que tiene el brazo articulado, es por ello que en este apartado se ha considerado una segunda posición típica de trabajo, en este caso se decidió colocar el mecanismo en una posición donde el movimiento se genera solamente en el eslabón, como se muestra en la figura 2.18, bajo ese criterio se ha definido una restricción de empotramiento en la pluma y el brazo, por otro lado, una con una condición de desplazamiento lineal sobre el actuador que impulsa el cucharón excavador, es decir, sobre el varillaje.



**Figura 2.19** 2Coordenadas y distancias entre puntos A-H-P en la posición 2

Una vez colocado el mecanismo en la posición 2 se procede a medir las distancias como se muestra en la figura 2.19 en los dos componentes x & y entre el punto de referencia A con respecto a las fuerzas actuantes que se encuentran, es decir, fuerza H y fuerza P



**Figura 2.20** Diagrama de fuerzas actuantes en el cucharón en la posición 2

En la figura 2.20 se muestra la dirección de las fuerzas presentes en la posición 2, junto con un eje de coordenadas, para su posterior análisis en la sumatoria de momentos.

#### **Ecuación 2.4 Sumatoria de momentos posición 2**

$$\sum M_A = 0$$

$$F_{Hx}(d_{Hy}) + F_{Hy}(d_{Hx}) - P_x(d_{Py}) - P_y(d_{Px}) = 0$$

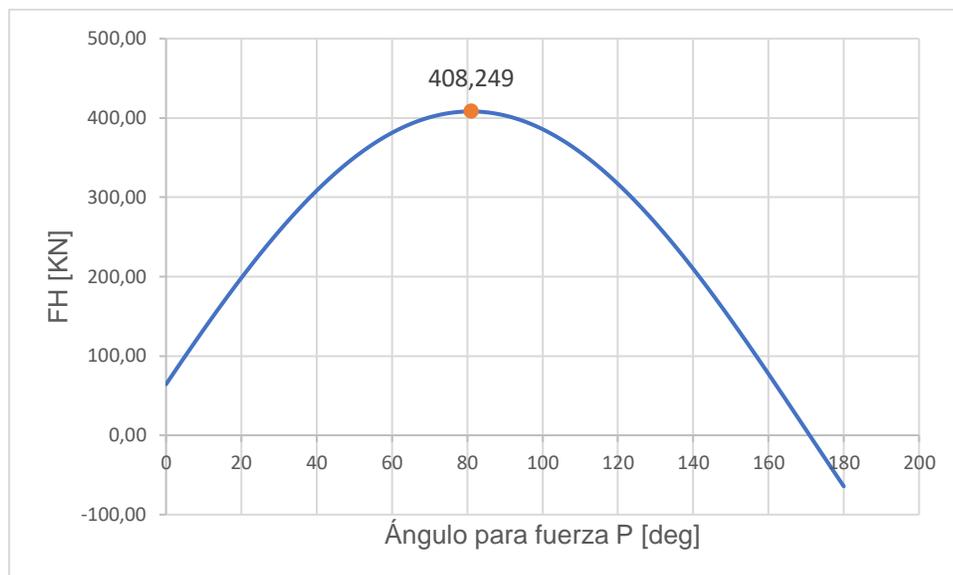
$$F_H \cos \alpha (d_{Hy}) - F_H \sin \alpha (d_{Hx}) - P \cos \beta (d_{Py}) - P \sin \beta (d_{Px}) = 0$$

$$F_H = \frac{P \cos \beta (d_{Py}) + P \sin \beta (d_{Px})}{\cos \alpha (d_{Hy}) + \sin \alpha (d_{Hx})} \quad [2.4]$$

Los valores para la posición 2 son:

$$\begin{aligned} \alpha &= 77,15^\circ \\ d_{Hx} &= 0,07 \text{ m} \\ d_{Hy} &= 0,34 \text{ m} \\ d_{Px} &= 0,94 \text{ m} \\ d_{Py} &= 0,15 \text{ m} \end{aligned}$$

El ángulo  $\beta$  correspondiente a la dirección de aplicación de la fuerza P se evaluó entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  a fin de determinar el ángulo que genera el valor máximo de la fuerza  $F_H$  que se aplica en el eslabón de estudio.



**Figura 2.21** Valor de fuerza FH según la variación del ángulo  $\beta$  en la posición 2

De acuerdo con los dos escenarios analizados previamente, es decir, en las posiciones 1 y 2 variando únicamente el ángulo beta, y analizando todas las direcciones posibles en un rango de giro entre  $0 - 180^\circ$  se tiene que el valor máximo obtenido es de  $F_H = 408,249$  KN, valor obtenido en la segunda posición, como se muestra en la figura 2.21

### 2.4.3. ANÁLISIS DEL ESLABÓN DE POTENCIA POR FEM

A continuación, se detalla la metodología para el análisis FEM que por sus siglas hace referencia al método por elementos finitos, del eslabón original y los dos rediseños optimizados, así como también con los dos materiales analizados.

Al iniciar la interfaz worbench de ansys se procedió a crear un módulo llamado geometría, básicamente en este apartado lo que se realiza es la importación del modelo tridimensional que vamos a utilizar, una vez que se ha ingresado el modelo 3D en formato step a la interfaz se debe crear un nuevo módulo llamado Static Sstructural y éste debe estar enlazado con el módulo anterior, es decir con el módulo geometría. En ese sentido, es posible apreciar que en el banco de análisis estructural conlleva una serie de pasos en orden que nos solicita el software para realizar la simulación.

Cabe recalcar que antes de ingresar los datos de requerimientos previos a la simulación, se debe crear una carpeta nueva de material en el apartado Engineering data, dado que al momento de

ingresar al Static Structural no vamos a poder definir el material, sin antes haberlo creado en la interfaz principal.

Bajo esta perspectiva, se muestra a continuación la descripción de lo que se realizó cada una de las etapas para poder generar una simulación de tipo estática estructural.

#### 2.4.3.1. Etapa 1: Aplicación del Material Original

Desde un punto de vista general, todos los elementos mecánicos de la maquinaria pesada están fabricadas con acero de tipo estructural, lo que garantiza una elevada resistencia en relación con el uso al que están sometidas durante todo el ciclo de vida de la máquina. La aplicación de materiales no convencionales para estos sectores, como aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio, titanio y materiales compuestos, conlleva grandes beneficios enlazados inicialmente con la reducción de masa (Solazzi et al., 2019).

De acuerdo con la investigación realizada por (Carlos et al., 2016) el material más común para la fabricación de los elementos del brazo excavador corresponde a un acero AISI 1522. Las propiedades mecánicas del material en mención, como se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Propiedades mecánicas AISI 1522

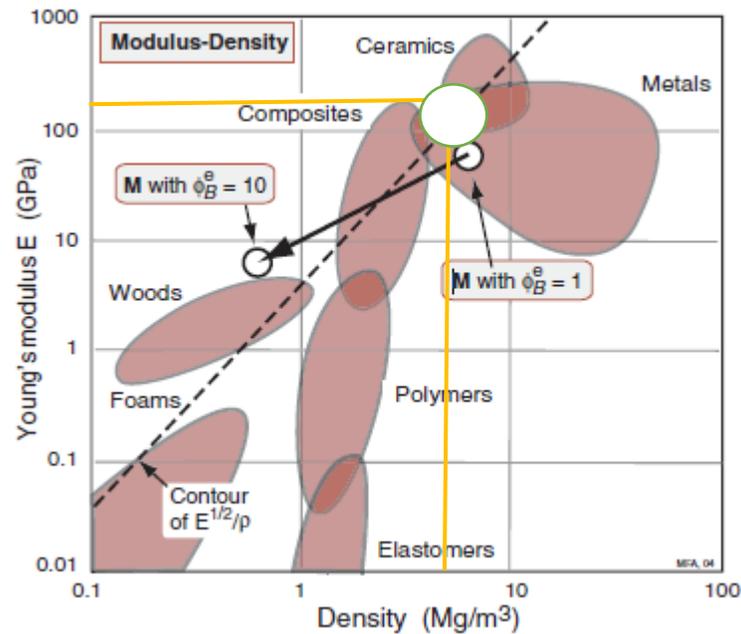
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7700	kg/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson	0,27	-
Módulo de elasticidad	190-210	GPa
Límite elástico	352	MPa
Límite de tracción	420	MPa

Fuente: (Carlos et al., 2016)

Básicamente en esta etapa se realizó el proceso de aplicación de material, el mismo se justifica en función de la investigación previa realizada, en ese sentido, se ingresó como parámetro inicial el material original del elemento con todas sus propiedades mecánicas.

#### 2.4.3.2. Selección de material a través del diagrama de Michael Ashby

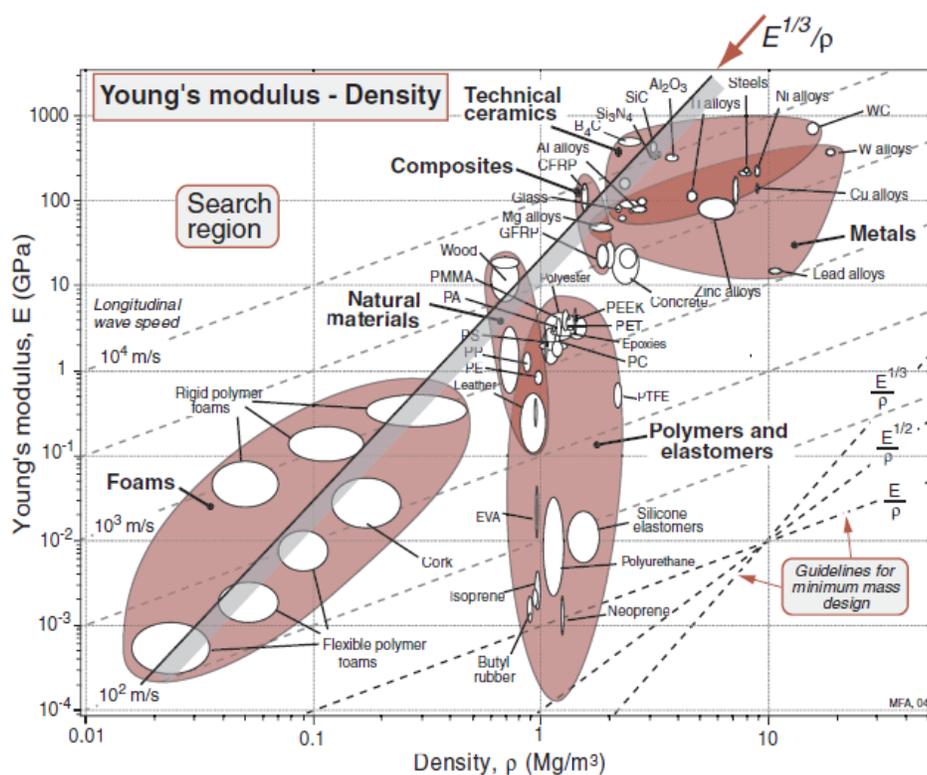
Bajo el criterio de la selección de materiales, se llevó a cabo un análisis de datos y requerimientos que necesita el componente. Inicialmente se midió las propiedades, mismas que fueron obtenidas mediante una previa revisión bibliográfica obteniendo así una hoja de datos, donde se hizo énfasis en las propiedades generales tales como: densidad, precio y por otro lado la clasificación de las propiedades mecánicas del material.



**Figura 2.22** Graficos por familia de materiales

Obtenido de: (Ashby et al., 2005, pág. 313)

Desde un punto de vista general los gráficos por familia permiten visualizar los distintos tipos de materiales tales como polímeros, cerámicos, metales, compuestos, entre otros, con el objetivo de clasificar una familia en específico y de esa manera determinar un límite de aplicación según parámetros de diseño que se esté realizando. En ese sentido se realizó un proceso de selección de la familia de los metales a través de la tabla de datos obtenidos previamente donde se mostró las propiedades generales y mecánicas del elemento original, como se muestra en la figura 2.22.



**Figura 2.23** Diagrama comparativo entre el módulo de young y la densidad  
Obtenido de: (Ashby et al., 2005, pág. 112)

Una vez seleccionado la familia de materiales general, se usó el diagrama de Ashby donde se muestra el módulo de Young en el eje de las ordenadas y por otro lado la densidad en el eje de abscisas. Bajo el criterio de selección, los requerimientos son, un material de tipo metálico, con un módulo de Young entre 190 – 2010 GPa, en función de la densidad la cual es de 7,7 Mg/m<sup>3</sup>. Una vez definido los parámetros, se realizó un proceso de selección, como se muestra en la figura 2.23 en la región de los metales, aquellos que cumplen ciertos requisitos, se encuentran las aleaciones de cobre, aleaciones de níquel, aleaciones de titanio y los aceros.

#### 2.4.3.3. Material alternativo de construcción

Como se muestra en la tabla 2.3 dentro del mercado local se encuentra tres opciones de planchas: acero ASTM A36, acero naval ASTM A131 y acero aleado Anti-Abrasivo, cuyas propiedades mecánicas son:

**Tabla 2.3** Propiedades mecánicas planchas de acero distribuidas localmente

Propiedades	ASTM A36	ASTM A131	ANTI-ABRASIVO
Límite elástico [MPa]	250	220	1163
Límite de tracción [MPa]	400	400	1316

Fuente: (DIPAC MANTA, 2024)

Si bien es cierto, existe un material alternativo llamado acero Anti-Abrasivo mismo que no tiene ninguna denominación AISI o ASTM ya que es un nombre comercial dentro de la industria local. Sin embargo, bajo otros índices de presentación el mismo material se lo conoce también como: FORA 400 y RELIA 500 que tienen las mismas propiedades físicas y mecánicas, en este caso RELIA 500 sigue la norma ASTM D790A, en conclusión, los 3 nombres se los considera denominaciones con términos basados en su misma industria de fabricación.

En ese sentido, el material alternativo por utilizar debe poseer características iguales o superiores al material base AISI 1522, por lo que se eligió el acero aleado Anti-Abrasivo, que de acuerdo con (DIPAC MANTA S.A, 2024) es un acero para aplicaciones en elementos de maquinaria pesada, por los beneficios que ofrece y sus prestaciones en términos de resistencia y dureza como se muestra en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Propiedades mecánicas Acero Anti-Abrasivo

<b>Propiedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Densidad</b>	8030	kg/m <sup>3</sup>
<b>Relación de Poisson</b>	0,3	-
<b>Módulo de elasticidad</b>	190-210	GPa
<b>Límite elástico</b>	1163	MPa
<b>Límite de tracción</b>	1316	MPa

Fuente: (DIPAC MANTA S.A, 2024)

#### 2.4.3.4. Etapa 2: Generación del Mallado

La precisión de las simulaciones depende en gran medida de la calidad de la malla utilizada. Una malla de alta calidad exhibirá métricas dentro de rangos aceptables, reflejará adecuadamente la física del problema y capturará los detalles geométricos necesarios. Es esencial evaluar estas métricas y mejorar la malla si es necesario. Se empleó el criterio de "Calidad del Elemento" para validar la calidad de la malla, que varía de 0 a 1, como se muestra en la figura 38, donde 0 representa una calidad baja (inaceptable) y 1 una calidad alta (excelente).

Skewness mesh metrics spectrum:

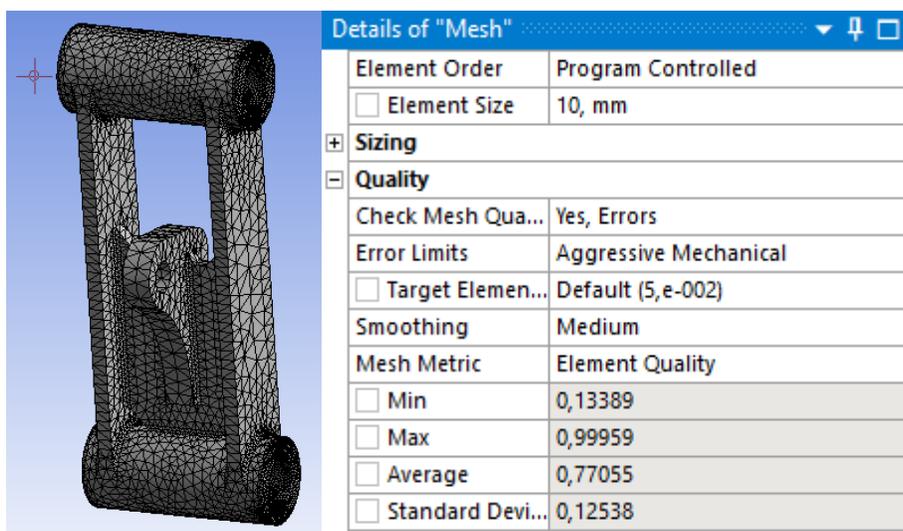


Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



**Figura 2.24** Espectro de métrica de calidad de malla  
Obtenido de: (Ardila-Marín et al., 2016)

En este proceso se aplicó técnicas y/o criterios de mallado, con el objetivo principal de que el mismo sea de alta calidad para validar los resultados que se vayan a obtener, como se muestra en la figura 2.24. En ese sentido se resalta que el mallado conlleva el 80% para que los resultados tengan un alto nivel de confiabilidad.

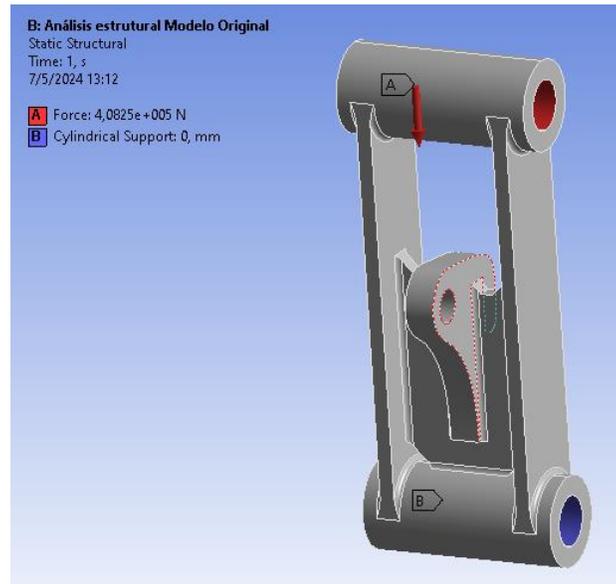


**Figura 2.25** Mallado del modelo original

Para el análisis estructural de los modelos original, modelo 1 y modelo 2, se obtuvo un valor promedio por encima de 0,7 como se muestra en la figura 2.25, indicando una calidad de malla muy buena y proporcionando confianza en los resultados de las simulaciones. Los valores promedio de la malla se muestran en las figuras siguientes, específicas para cada uno de los modelos.

### 2.4.3.5. Etapa 3: Condiciones de Borde para el Análisis del Elemento Original

La carga de 408249N de compresión se aplicó en la superficie cilíndrica del eje superior del eslabón, mientras que la sujeción se establece en la cara cilíndrica inferior del eje del eslabón, con un tipo de empotramiento conocido como soporte cilíndrico.



**Figura 2.26** Condiciones de borde en el modelo original

En la figura 2.26 se muestran las condiciones de borde ingresados en el software para el respectivo análisis estructural.

## 2.5. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

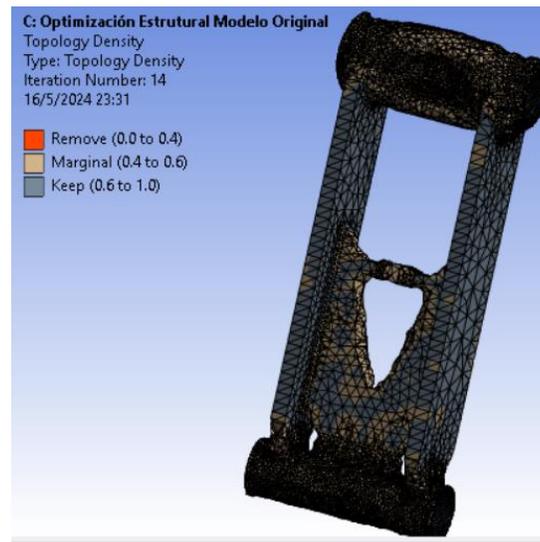
La optimización topológica viene de un previo análisis estático estructural al elemento original del eslabón en cual se obtuvo rediseñado el objeto tipo malla producto del escaneo 3D. Esta optimización permite obtener dos modelos alternativos al eslabón de potencia original de la excavadora CAT-420E para que, de ser el caso cumplan como alternativas de sustitución.

Además, se menciona que las optimizaciones se basaron en la reducción de material en las zonas de menor esfuerzo y cuyo porcentaje sea suficiente para que los modelos no queden sobredimensionados en demasía.

Ahora bien, si bien es cierto esta técnica nos ayuda mucho a simplificar la geometría de una pieza o estructura. No obstante, hay que tener en cuenta el orden cronológico a seguir antes de generar un nuevo modelo para pasarlo a un proceso de rediseño en un software CAD, por lo tanto, a continuación, se presentan los pasos más idóneos para la aplicar esta metodología.

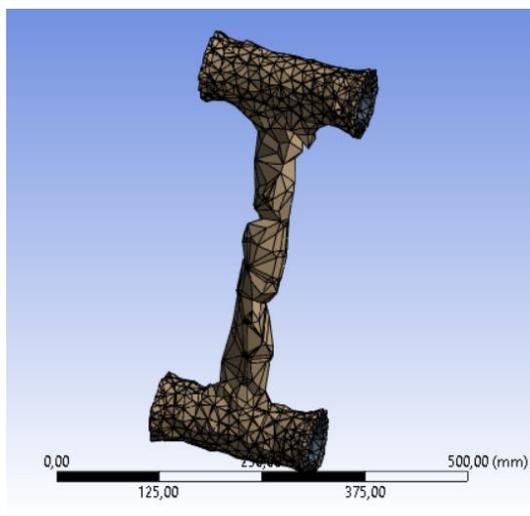
### 2.5.1. APLICACIÓN DE CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

De acuerdo con las condiciones de borde antes detalladas se procedió a aplicar algunos criterios de optimización estructural del eslabón, es decir, en este proceso se restringen los lugares donde se aplican cargas o esfuerzos para que el software tenga un alto índice de consideración y que dichas zonas no se vean afectadas para que no afecten su rendimiento mecánico, en ese sentido se aplicó todas estas consideraciones y el software permitió obtener la geometría aproximada de la optimización requerida y definir el modelo 1 (D1).



**Figura 2.27** Geometría Aproximada a Partir de Optimización Topológica

En ese sentido, en cuanto a consideraciones de condiciones de borde se deben plantear las mismas restricciones del elemento original, es decir, aplicar el mismo modo operativo, para que el software automáticamente nos genere la primera aproximación de geometría, como se muestra en la figura 2.27



**Figura 2.28** Segunda geometría aproximada a partir de optimización topológica

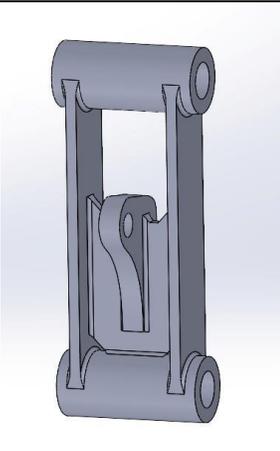
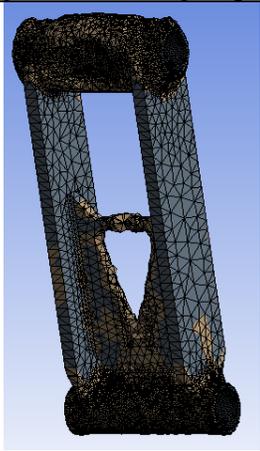
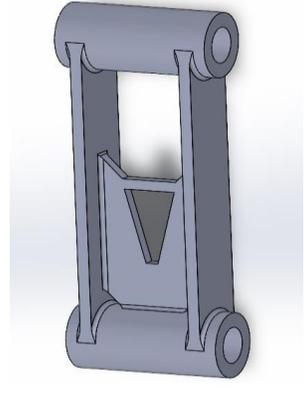
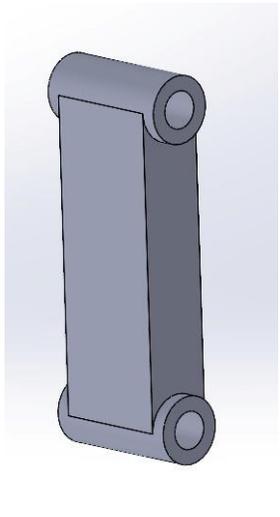
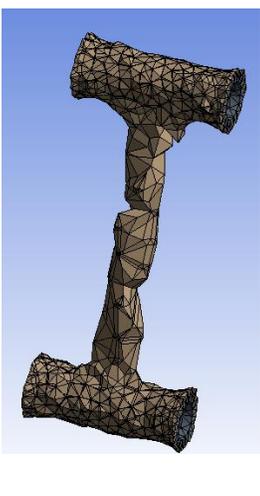
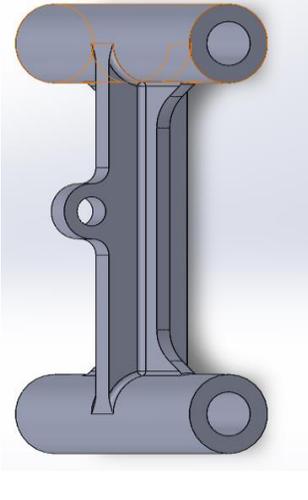
Por otra parte, para la obtención del modelo 2 (D2) se partió de un modelo base sólido completamente relleno y a partir del proceso computacional se determinó la geometría aproximada optimizada, como se muestra en la figura 2.28 para la cual en el diseño se consideró los espesores de planchas disponibles en el mercado a fin de que el modelo planteado sea válido en caso de requerirse construir.

### **2.5.2. REDISEÑO DEL ESLABÓN MEDIANTE OPTIMIZACIÓN**

Si bien es cierto, la optimización Topológica ayuda a generar una nueva geometría, es decir, una propuesta inicial de modelo. No obstante, dicha geometría debe ser tratada y ajustada en un software diseño CAD, debido a que el formato que nos entrega el módulo de optimización es un archivo Stl el mismo está compuesto de elementos de malla poligonal.

Básicamente se debe ir repasando los trazos, aristas y líneas obtenidas, con ayuda de las herramientas CAD que nos ofrece el software de diseño en el que se esté trabajando, como se muestra en la Tabla 2.5 se ha generado un modelo nuevo completamente rediseñado a partir del modelo original.

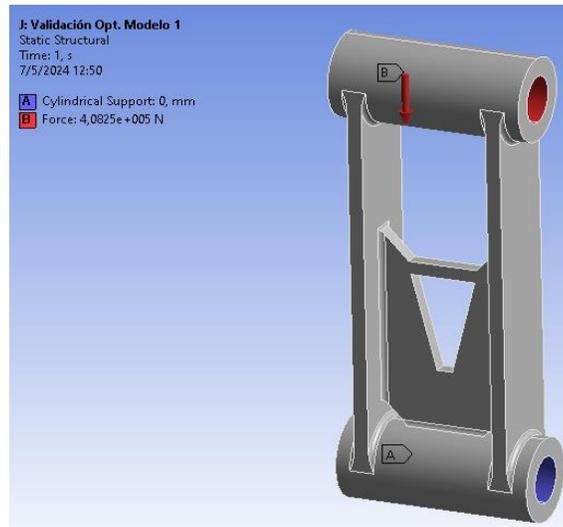
**Tabla 2.5** Optimización Topológica y Rediseño del Eslabón

Modelo Base	Optimización Topológica	Rediseño
		<p data-bbox="1130 310 1308 344">Modelo 1 (D1)</p> 
		<p data-bbox="1130 751 1308 785">Modelo 2 (D2)</p> 

**Fuente:** Autoría propia

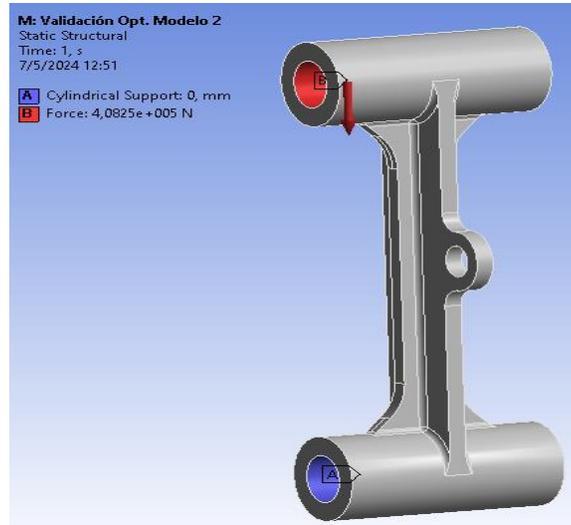
### 2.5.3. CONDICIONES PARA EL ANÁLISIS MODELO 1 Y 2

En este apartado se aplicó la misma metodología FEM que se usó para el modelo original, en este caso para eslabón modelo 1, así como también con otro tipo materiales y posterior a ello analizarlos, es decir, que las condiciones de borde se mantienen, así como también el material, y la aplicación de criterios de mallado.



**Figura 2.29** Optimización del modelo 1

Como se muestra en la figura 2.29 se aplicó la misma de operación, como en el modelo original, y para tener valores fiables en los resultados que nos arroje la simulación, el único factor en los datos de entrada es la geometría, ya que en este caso tenemos un nuevo modelo, y lo que se va analizar es el comportamiento mecánico del mismo.



**Figura 2.30** Optimización del modelo 2

Bajo los criterios del diseño generativo, se obtuvo el nuevo rediseño, mismo que para sea validado se lo sometió al mismo análisis del modelo original, es decir, aplicado con una fuerza de compresión en el eje superior y empotrado con un ajuste llamado apoyo cilíndrico, como se muestra en la figura 2.30

#### 2.5.4. CASO ESPECIAL

Si bien es cierto el mecanismo de brazo hidráulico realiza operaciones de trabajo paralelos a la superficie de contacto, donde las cargas se distribuyen uniformemente, en teoría. No obstante, existen solicitudes operativas en condiciones extremas donde el mecanismo se somete adicionalmente a fuerzas asimétricas, es decir, a torsión, específicamente en los extremos del eslabón de potencia H.

En ese sentido, los modelos alternativos que nos arroja el módulo de optimización topológica se los ha agregado a una nueva condición de trabajo adicional, es decir, un análisis sometido a torsión, de esta manera se valida con más eficacia los modelos propuestos.

##### 2.5.4.1. Cálculo de Fuerza Asimétrica

Con el objetivo de obtener el valor de fuerza aplicado en el lateral del bocín se realizó un proceso de iteraciones en software de simulación ANSYS especialmente en el módulo static estructural. En primera instancia se realizó el proceso de discretización, es decir, se introdujo el modelo, material, mallado, condiciones de borde y finalmente la solución de resultados, se resalta que el modelo a utilizarse en este análisis es el diseño original (D0) debido a que los modelos alternativos deben regirse a las mismas solicitudes de trabajo para su validación, por otro lado, en el apartado de condiciones de borde o frontera, se aplicó un valor de fuerza arbitrario, es decir, cualquier valor, con el objetivo de tener un factor de seguridad de 1, esto se traduce a obtener el valor máximo que resiste el elemento.

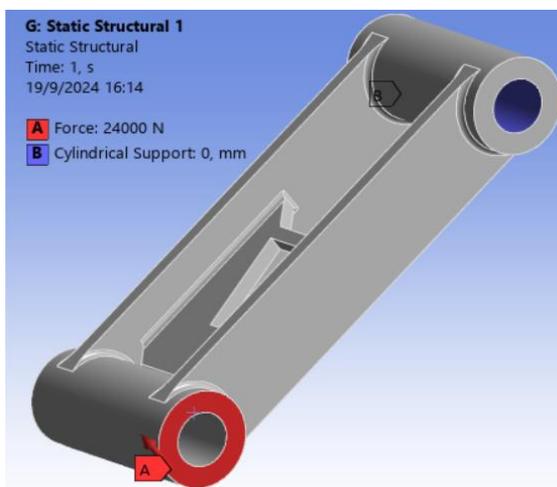


**Figura 2.31** Valor de carga aplicada y Factor de seguridad

En ese sentido, se determinó que el valor máximo de carga que soporta el modelo es de 24000N, como se muestra en la figura 2.31 obteniendo así un factor de seguridad de 1.

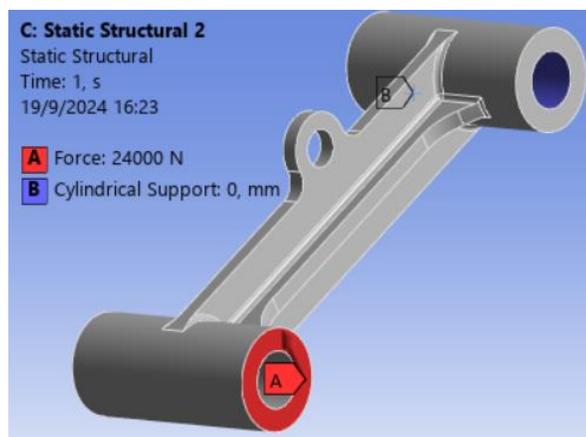
#### 2.5.4.2. Condiciones para el Análisis de Torsión

Bajo el previo análisis del cálculo de fuerza asimétrica realizado, y la obtención del su valor, es decir, los 24000N, ahora dicha carga se aplicó en los modelos alternativos, para así validarlos con los mismos parámetros ingresados en el apartado condiciones de borde.



**Figura 2.32** Condiciones de borde para el modelo 1 y 2

Se ingresó una condición de sujeción cilíndrica en la parte superior, y por otro lado un vector de fuerza en el eje de las Y, para el modelo alternativo 1 como se muestra en la figura 2.32.



**Figura 2.33** Condiciones de borde para el modelo 1 y 2

En la figura 2.33 se muestra la aplicación de carga obtenida del proceso de iteración en con dirección en el eje de las Y, y una condición de borde de tipo cilíndrica en la parte superior.

## 2.6. CONFIGURACIÓN PARA LA ETAPA MANUFACTURA ADITIVA

Una vez obtenido los modelos a partir de la etapa optimización topológica, se lleva a cabo el proceso de prototipado, se destaca que la selección del equipo a usarse se realizó en función a la solicitud del trabajo de grado presente, es decir, la aplicación de la impresora 3D es usada con fines educativos y la generación de prototipo se lo presenta a una escala reducida. En ese sentido se debe resaltar que a pesar de que son modelos a escala los mismos son completamente validados, a través de una metodología rigurosa aplicando criterios de diseño mecánico en un software CAE a escala real.

### 2.6.1. CARACTERÍSTICAS DE LA IMPRESORA CR-6- MAX

El equipo de impresión tridimensional CR-6-MAX satisface la propuesta de manufactura del trabajo, es decir, prototipado rápido con fines académicos. Como se muestra en la tabla 2.6 se puede visualizar cada una de las características técnicas y parámetros principales de impresión.

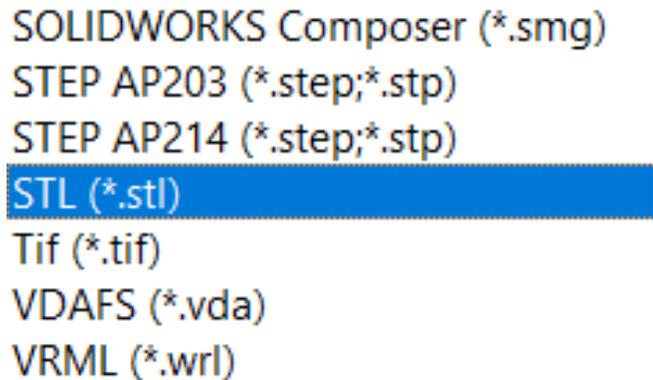
**Tabla 2.6** Especificaciones de CR-6- MAX

<b>Características principales</b>	<b>CR-6- MAX</b>	<b>Características adicionales</b>
Tamaño de la máquina	Alto:725 mm Ancho:640 Espesor de base:691	<b>Accesorios</b> Eje z de doble motor <b>Entrega de archivos</b> Unidad Usb/sd
Peso de la máquina	12 kg	<b>Software</b>
Diámetro de la boquilla	0,4 mm	Cura/Slicer/Simplify 3D/Creality
Espesor de la capa	0,1-0,4 mm	
Material compatible	PLA, ABS, PETG	
Tamaño de impresión	400* 400 *400	
Precisión de posición XY	0,01 mm	
Formatos de archivo	Stl;Obj;Amf	

**Fuente:** (AG Electrónica, n.d.)

### 2.6.2. EXPORTACIÓN DEL FORMATO STL EN SOFTWARE CAD

Una vez obtenido el modelo 3D mismo que ha sido validado a través de la metodología CAE, se prosigue a transformar el archivo sldprt CAD en un formato stl, es decir, estandarizado.



SOLIDWORKS Composer (\*.smg)  
STEP AP203 (\*.step;\*.stp)  
STEP AP214 (\*.step;\*.stp)  
**STL (\*.stl)**  
Tif (\*.tif)  
VDAFS (\*.vda)  
VRML (\*.wrl)

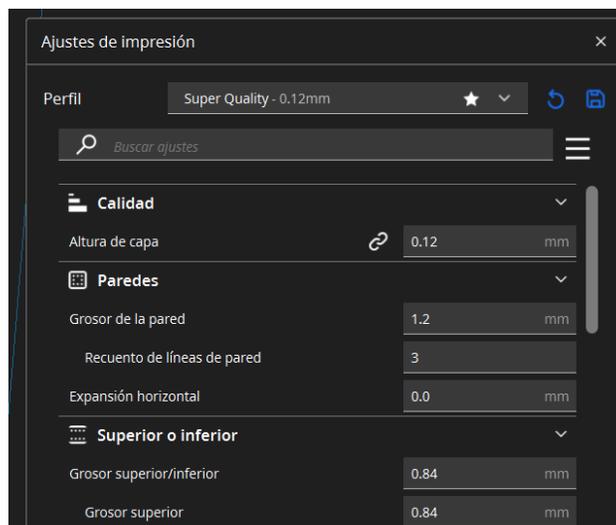
**Figura 2.34** Fase de transformación del modelo 3D a STL

Como se muestra en la figura 2.34 el formato mencionado sirve para que el programa que usa la impresora pueda reconocer, leer, y descifrar el contenido del archivo, cabe destacar la importancia de una buena configuración en el software se reflejará en el objeto final.

### 2.6.3. AJUSTE DE IMPRESIÓN DEL SÓLIDO

En primer lugar, se debe utilizar un software compatible con el equipo de impresión 3D para poder realizar los ajustes necesarios y que el sólido resultante no genere una mala visualización estética ya que el propósito del trabajo es ver una aplicación de la optimización topológica mismo que se observará como un modelo prototipado a escala reducida.

En ese sentido, se hizo uso del software UltiMaker Cura para la configuración de parámetros de impresión tales como: escala, espesor del filamento, número de extrusores, y demás valores que solicita el software.

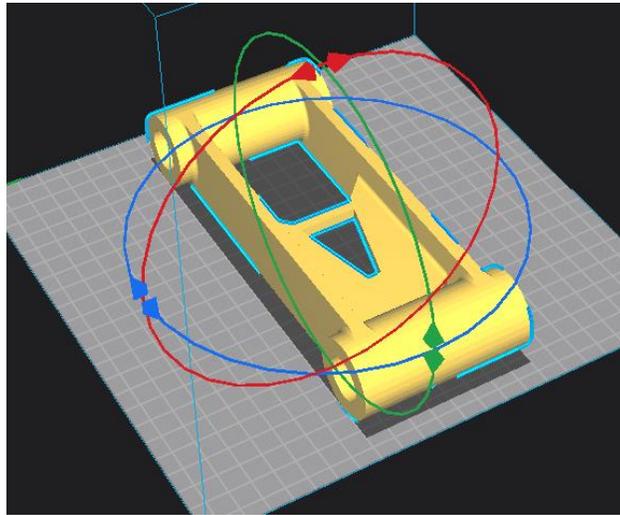


**Figura 2.35** Configuración de parámetros en software UltiMaker Cura

En este apartado se realizó el ajuste de impresión, inicialmente reacondicionar el factor de altura de capa, si fuese necesario el grosor de las paredes como se muestra en la figura 2.35 después de realizar todo el ajuste en el software se procedió a guardar el archivo, el software automáticamente convierte todas las configuraciones a un tipo de código G y finalmente pasar el archivo a unidades de almacenamiento de tipo usd, sd, según la configuración de hardware del equipo.

#### **2.6.4. PERSPECTIVA DE PROTOTIPADO EN SOFTWARE CURA**

En este apartado se procede a imprimir los modelos 3D como propuesta de fabricación aditiva inicial, y así satisfacer el apartado CAM. El material usado para este apartado fue PLA, ya que desde un punto de vista económico el material es más barato en comparación con otra materia prima disponible a nivel local, además de ello el objetivo del trabajo es la aplicación de optimización topológica en una autoparte representada a través de un prototipo, y el material mencionado es el más eficaz como punto demostración.



**Figura 2.36** Ajuste de rotación, patrón de relleno, grosor del relleno

En la figura 2.36 se muestra la altura de la capa el cual es un parámetro fundamental en la calidad de la impresión. 3D, influenciando directamente el nivel de detalle de la pieza final. Generalmente, se ajusta entre 0.1 mm y 0.3 mm, dependiendo de los requisitos de precisión del proyecto.

## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

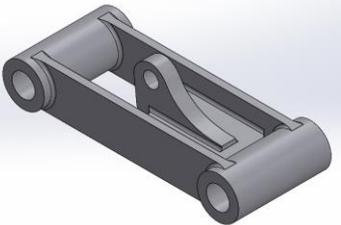
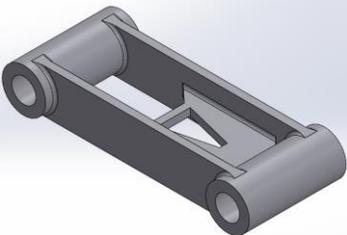
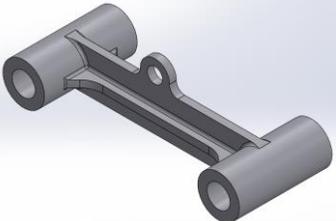
#### 3.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada simulación realizada y de esa manera generar una comparativa entre los diferentes modelos y/o geometrías obtenidas a partir de la optimización topológica en función del material aplicado, índice de esfuerzos, y factor de seguridad.

##### 3.1.1. MASA

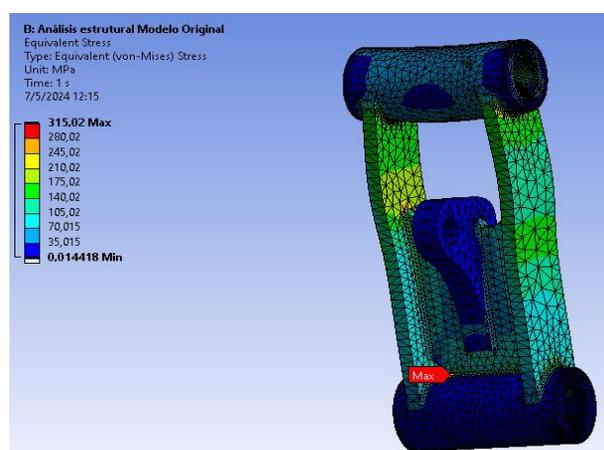
A continuación, en la tabla 3.1 se detallan los resultados de masa para cada uno de los modelos con la asignación de cada uno de los materiales, cabe destacar que se detalla la masa en unidades de kg.

**Tabla 3.1** Detalle de masa por modelo y material

Modelo	AISI 1522 (m0)	Acero Anti-Abrasivo (m1)
 D0	25,930 kg	27,042 kg
 D1	23,146 kg	24,138 kg
 D2	19,071 kg	19,888 kg

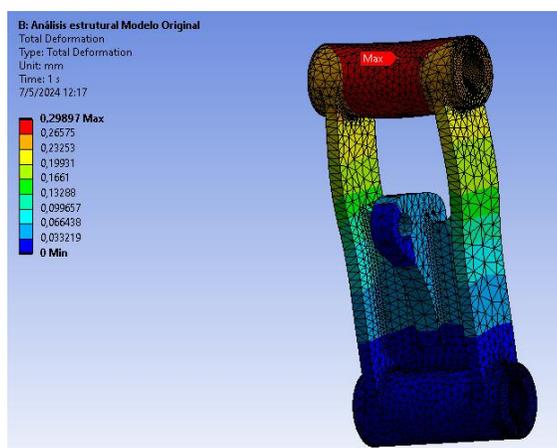
### 3.1.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MODELO ORIGINAL (D0) CON MATERIAL AISI 1522(M0)

Los resultados indican que el esfuerzo máximo experimentado por el modelo original, utilizando el material AISI 1522, es de 315,02 MPa, lo que se encuentra dentro de los límites aceptables de resistencia para dicho material. Esto demuestra que el diseño es capaz de soportar las cargas operativas típicas, ya que dentro de la teoría de diseño de máquinas y elementos se considera al esfuerzo de fluencia o también llamado límite elástico, como punto de máximo esfuerzo que se debe tolerar.



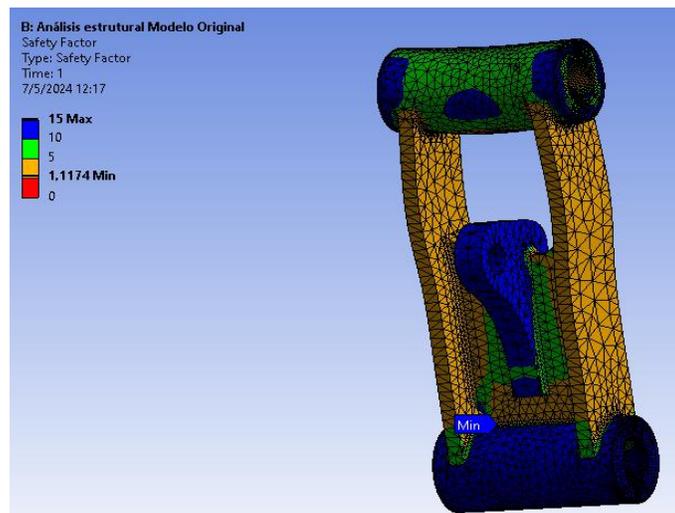
**Figura 3.1** Esfuerzo de Von Mises D0-M0

Como se muestra en la figura 3.1 el esfuerzo máximo que nos arroja la simulación es menor al esfuerzo de fluencia, por lo tanto, se concluye que el elemento en su estado normal realiza un trabajo equitativamente funcional.



**Figura 3.2** Deformación máxima D0-M0

Si bien es cierto el límite de fluencia se define como el límite elástico máximo que tiene un material, es decir, que al aplicar un esfuerzo el material se deforma, pero al dejar de aplicar el mismo esfuerzo el material regresa a su estado normal. No obstante, en términos versatilidad y apreciación del fenómeno, el valor que se encontró en la deformación máxima es de 0,29 mm como se muestra en la figura 3.2 lo que sugiere una respuesta estructural adecuada ante las fuerzas aplicadas, por lo tanto, su valor es imperceptible al ojo humano ya que es un elemento muy robusto.

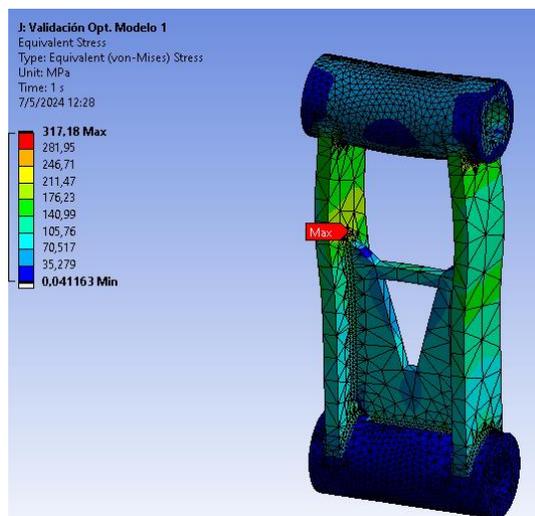


**Figura 3.3** Factor de seguridad D0-M0

Un aspecto destacado de los resultados es el factor de seguridad, mismo que nos arroja el software con un valor de 1,11 adimensional, como se muestra en la figura 3.3. Dentro de la teoría del diseño de máquinas y elementos si tenemos un valor por encima de uno indica que el modelo puede soportar la carga máxima durante las condiciones de trabajo sin experimentar fallos. Sin embargo, dentro de los criterios del diseño mecánico, se recomienda un factor de seguridad por encima del 1,5 para poder validar un buen diseño. En ese sentido, se debe considerar algunos factores, tales como; económicos, disponibilidad de material, proceso de manufactura, entre otros.

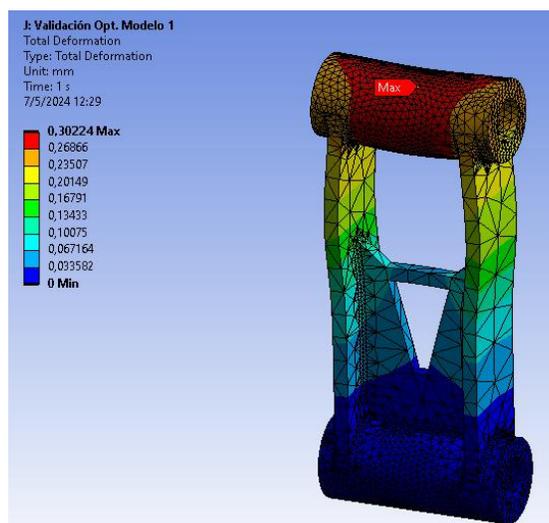
### **3.1.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 1(D1) CON MATERIAL AISI 1522 (M0)**

Los resultados muestran que el modelo original, utilizando el material AISI 1522, experimenta un esfuerzo máximo de 317,18 MPa, dentro de los límites aceptables de resistencia.



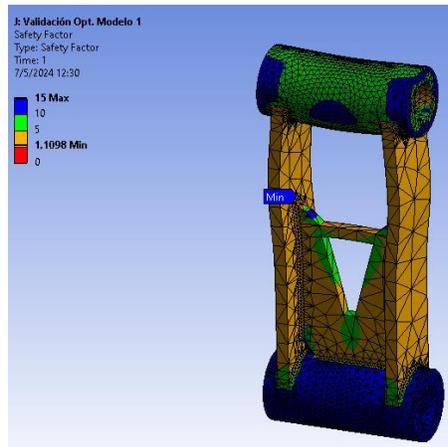
**Figura 3.4** Esfuerzo de Von Mises D1-M0

Como se muestra en la figura 3.4 el esfuerzo máximo que nos arroja la simulación con el modelo alternativo 1 es menor al esfuerzo de fluencia, por lo tanto, se concluye que el elemento en su estado normal realiza un trabajo equitativamente funcional.



**Figura 3.5** Deformación máxima D1-M0

En la figura 3.5 se evidencia la capacidad del diseño para resistir las cargas operativas habituales. Además, se observa una deformación máxima de 0,30 mm, lo que indica una respuesta estructural adecuada ante las fuerzas aplicadas.

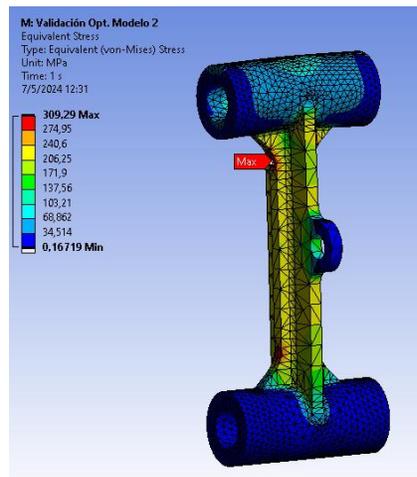


**Figura 3.6** Factor de seguridad D1-M0

En lo esencial, se destaca el factor de seguridad calculado con un valor de 1,10 como se muestra en la figura 3.16 lo que significa que el modelo puede soportar la carga máxima durante las condiciones de trabajo sin experimentar fallos, además se redujo una breve cantidad de material con respecto al modelo original.

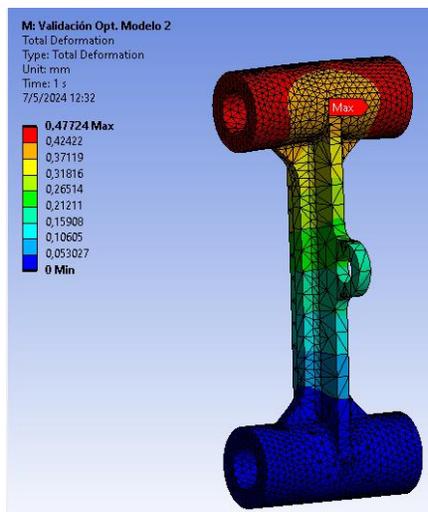
#### 3.1.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 2 (D2) CON MATERIAL AISI 1522 (M0)

El análisis del modelo original con material AISI 1522 arrojó resultados satisfactorios. Se determinó que el esfuerzo máximo experimentado fue de 309,30 MPa, lo que se encuentra dentro de los límites aceptables para este material, demostrando la capacidad del diseño para soportar las cargas operativas típicas.



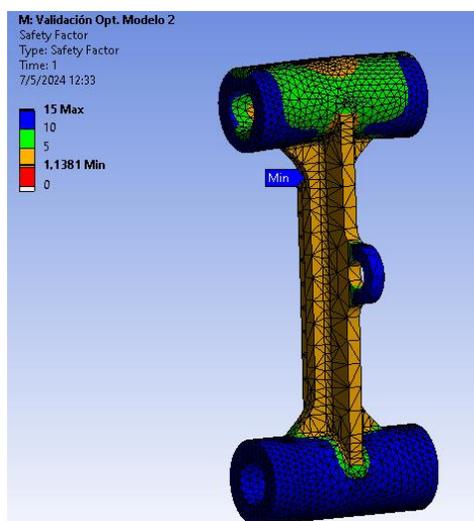
**Figura 3.7** Esfuerzo de Von Mises D2-M0

Como se muestra en la figura 3.7 se aprecia que la región con mayor índice de esfuerzos se distingue en color rojo, es decir en el contacto, entre el eje superior y los refuerzos modelados en el eje horizontal.



**Figura 3.8** Deformación máxima D2-M0

Por otro lado, la deformación máxima registrada fue de 0,47 mm como se muestra en la figura 3.8, indicando una respuesta estructural adecuada ante las fuerzas aplicadas, cabe mencionar que el modelo M2, con ello se puede concluir que la geometría alternativa cumple con los requisitos mecánicos que el mecanismo necesita.



**Figura 3.9** Factor de seguridad D2-M0

Un aspecto crucial de los resultados es el factor de seguridad, calculado en 1,14, como se muestra en la figura 3.9, un valor superior a la unidad original que confirma que el modelo puede soportar la carga máxima sin fallar durante las condiciones de trabajo normales. En conjunto, estos resultados evidencian la solidez del diseño y su capacidad para cumplir con los requerimientos de funcionamiento sin comprometer su integridad.

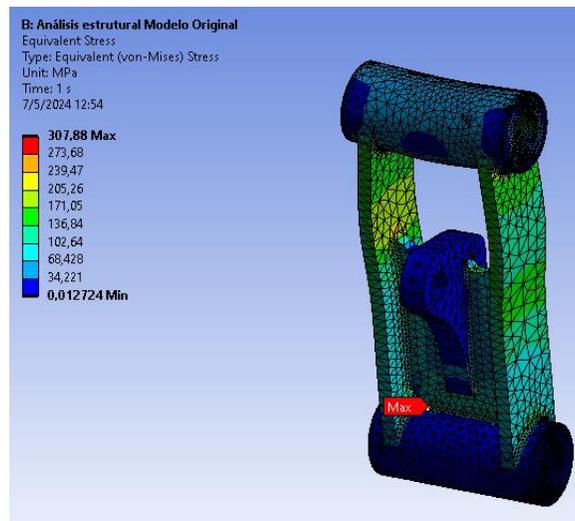
Como resultado del análisis estructural de los diferentes modelos con el material original se muestra los resultados obtenidos bajo los 3 criterios FEM tomados para el rediseño que son: esfuerzo, deformación y factor de seguridad. Lo más relevante de este análisis se encuentra en el modelo alternativo 2 y la masa, que es de 19.07kg como se muestra en la tabla 3.2, ya que se evidencia una reducción significativa de la masa con respecto al modelo original y con factor de seguridad mayor a 1.

**Tabla 3.2** Comparativa de criterios del análisis FEM con material original (M0)

<b>Modelo</b>	<b>Material</b>	<b>Esfuerzo de Von-Mises (MPa)</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b>Factor de seguridad</b>	<b>Masa (kg)</b>
Original	AISI 1522	315.02	0.29	1.11	25.93
Alternativo 1	AISI 1522	317.18	0.30	1.10	23.14
Alternativo 2	AISI 1522	309.29	0.47	1.13	19.07

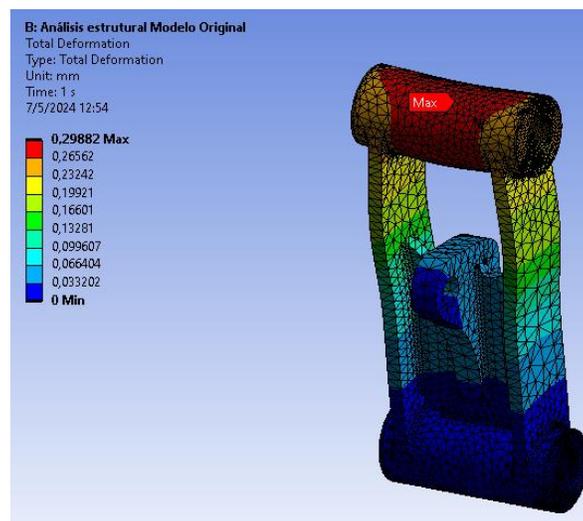
### **3.1.5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO ORIGINAL (D0) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1)**

El análisis del modelo original con un nuevo material, es decir con un acero Anti-Abrasivo ha arrojado resultados satisfactorios. Se ha comprobado que el esfuerzo máximo alcanzado es de 307,8 MPa, un valor dentro de los límites de resistencia aceptables para este material. Esto confirma la capacidad del diseño para soportar las cargas operativas típicas sin riesgo de fallo.



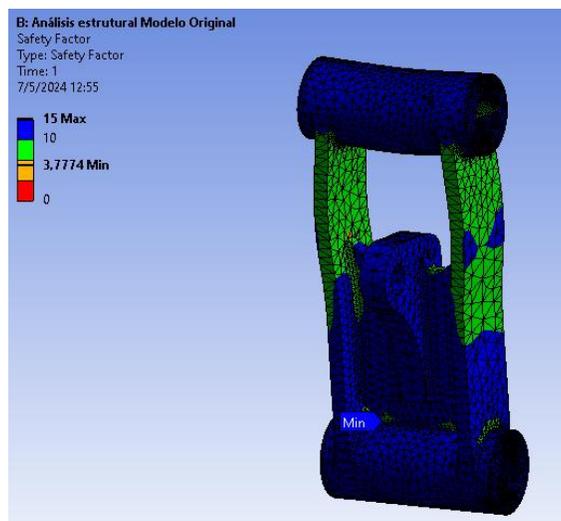
**Figura 3.10** Esfuerzo de Von Mises D0-M1

La aplicación de un material de igual o mejores prestaciones que el diseño original repercute directamente en el aumento de rigidez y resistencia del mismo, es por ello que los resultados obtenidos arroja índices de esfuerzo mínimos, como se muestra en la figura 3.10.



**Figura 3.11** Deformación máxima D0-M1

Un aspecto relevante en este caso es que la deformación máxima registrada es de 0,29 mm valor similar al previo análisis realizado con el material original como se muestra en la figura 3.11, lo que indica una respuesta estructural adecuada ante las fuerzas aplicadas.



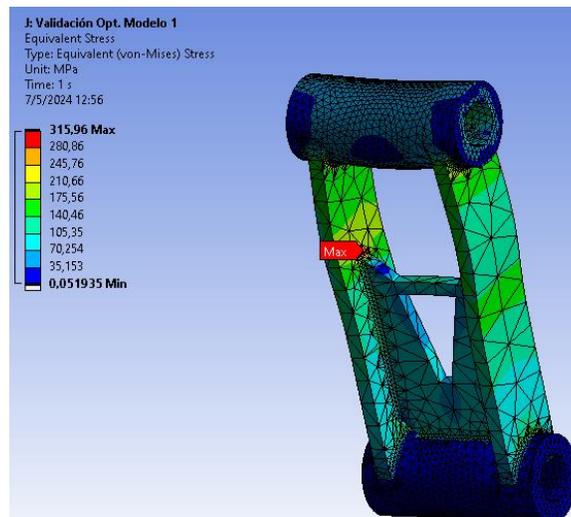
**Figura 3.12** Factor de seguridad D0-M1

En ese sentido, un aspecto relevante de los resultados es el factor de seguridad, calculado en 3,77, un valor significativamente superior a 1 como se muestra en la figura 3.12 mismo que garantiza que el modelo puede soportar la carga máxima sin fallar durante las condiciones de trabajo normales.

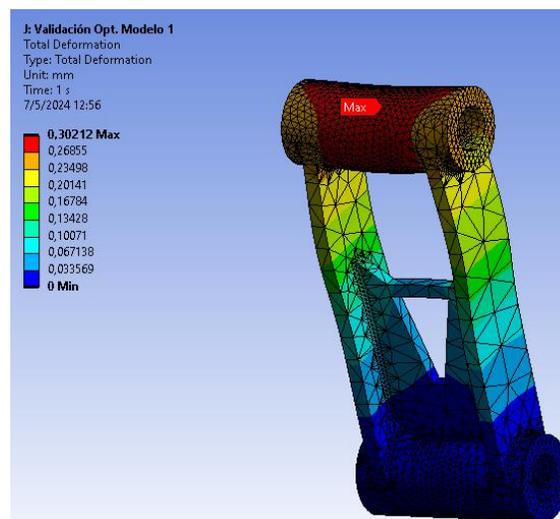
En este caso se observa que, el FS triplica su valor en relación con el material original, esto básicamente debido a que el material alternativo a usarse tiene un límite de fluencia muy elevado, así que, en conjunto, estos resultados demuestran la solidez del diseño y su capacidad para cumplir con los requerimientos de funcionamiento sin comprometer la integridad estructural del modelo.

### **3.1.6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 1 (D1) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1)**

El análisis estructural de la nueva propuesta, haciendo referencia al modelo 1 (D1), es decir, el eslabón de la excavadora CAT-420e, fabricado con acero anti-abrasivo, arrojó resultados favorables. El esfuerzo máximo registrado fue de 315,96 MPa, un valor inferior al límite elástico del material, lo que indica que el componente no fallaría bajo las condiciones de carga simuladas.

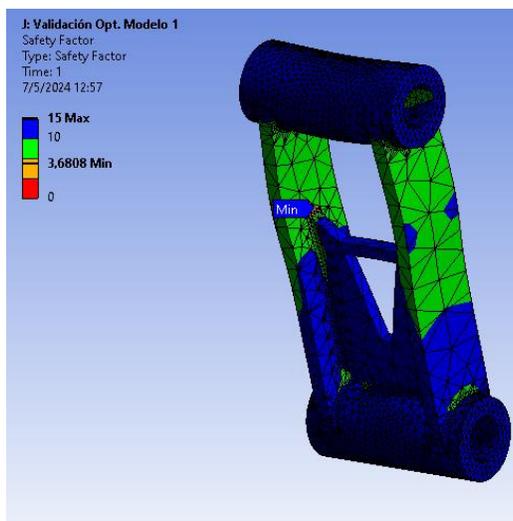


**Figura 3.13** Esfuerzo de Von Mises D1-M1



**Figura 3.14** Deformación máxima D1-M1

La deformación máxima registrada fue de 0,30 mm, un valor dentro de los rangos aceptables para este tipo de componentes, como se muestra en la figura 3.14.



**Figura 3.15** Factor de seguridad D1-M1

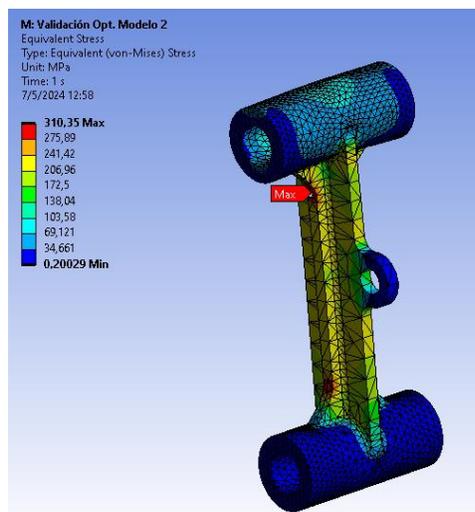
En la figura 3.15 se muestra el factor de seguridad, calculado en 3,68, es un indicador de la capacidad del eslabón para soportar cargas adicionales sin fallar. En este caso, el valor obtenido es significativamente superior a 1, lo que confirma la robustez del diseño y la capacidad del eslabón para cumplir con los requerimientos de funcionamiento sin comprometer su integridad estructural.

Por su parte, en comparación con los resultados obtenidos con el material original (M0) es tres veces más fuerte, es decir, que al elemento de máquina se le puede someter a condiciones muy extremas, así mismo el modelo es capaz de realizar mayor fuerza de excavación, visto desde un punto de vista ingenieril, es evidente que para que esto suceda debe existir una nueva configuración que modifique el mecanismo.

### **3.1.7. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL MODELO 2 (D2) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1)**

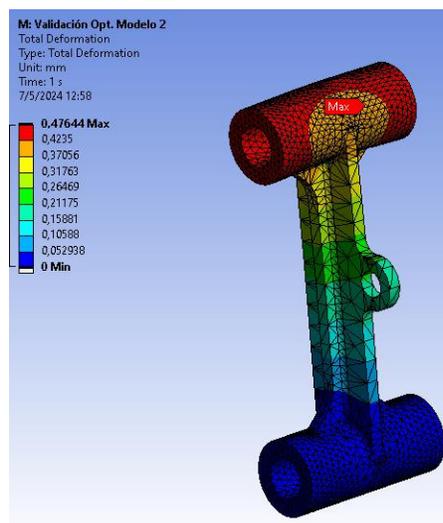
Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que el esfuerzo máximo registrado fue de 310,35 MPa, un valor inferior al límite elástico del material, lo que indica que el eslabón no fallaría bajo las condiciones de carga simuladas.

Los resultados de la simulación estructural demuestran que el eslabón de la excavadora CAT-420E, diseñado con Acero anti-abrasivo, posee la capacidad estructural necesaria para cumplir con los requerimientos de funcionamiento sin comprometer su integridad.



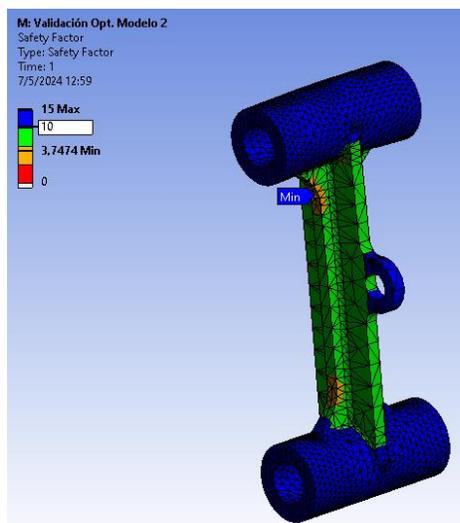
**Figura 3.16** Esfuerzo de Von Mises D2-M1

En este caso, al ser un elemento que constructivamente es menos complejo, se tiende a obtener un índice de esfuerzo de distintas magnitudes con relación al esfuerzo del modelo original, como se muestra en la figura 3.16



**Figura 3.17** Deformación máxima D2-M1

En este caso la deformación máxima registrada fue de 0,47 mm, un valor dentro de los rangos aceptables para este tipo de componentes como se muestra en la figura 3.17.



**Figura 3.18** Factor de seguridad D2-M1

En la figura 3.18 se presenta el factor de seguridad, calculado en 3,74, es un indicador de la capacidad del eslabón para soportar cargas adicionales sin fallar. En este caso, el valor obtenido es significativamente superior a 1, lo que confirma la robustez del diseño.

Como resultado del análisis estructural en la tabla 3.3 se muestran de los diferentes modelos con el material alternativo (anti abrasivo) se muestra una tabla con 3 criterios tomados para el rediseño que son: esfuerzo deformación y factor de seguridad. El modelo alternativo 2 sigue teniendo un porcentaje menor de masa dando como resultado una reducción de hasta 7.16kg con respecto al modelo original con el material anti abrasivo y un factor de seguridad de 3.74.

**Tabla 3.3** Comparativa de criterios del análisis FEM con material alternativo (M1)

Modelos	Material	Esfuerzo de Von-Mises (MPa)	Deformación (mm)	Factor de seguridad	Masa (kg)
Original	Anti-abrasivo	307.88	0.29	3.77	27.04
Alternativo 1	Anti-abrasivo	315.96	0.30	3.68	24.13
Alternativo 2	Anti-abrasivo	310.35	0.47	3.74	19.88

### 3.1.8. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 1(D1) CON MATERIAL AISI 1522 (M0)

Los resultados indican que el esfuerzo máximo experimentado con el modelo 1 (D1) utilizando el material AISI 1522 es de 333,16 MPa mismo que se encuentra dentro de los límites de resistencia aceptables para dicho material, como se muestra en la figura 61. Estos resultados demuestran que el diseño alternativo cumple satisfactoriamente con otra condición más de trabajo, y que con ello se valida su aplicación en operaciones de trabajo críticas. Además, se encontró que la deformación máxima tiene un valor de 2,53 mm valor que es perceptible, pero se encuentra dentro de los parámetros de diseño mecánico.

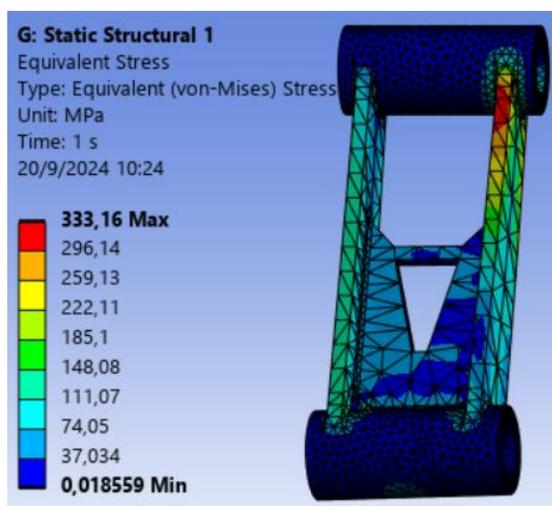


Figura 3.19 Esfuerzo de Von Mises D1-M0

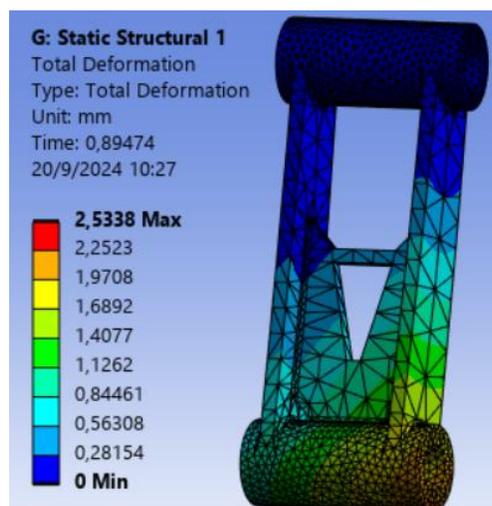
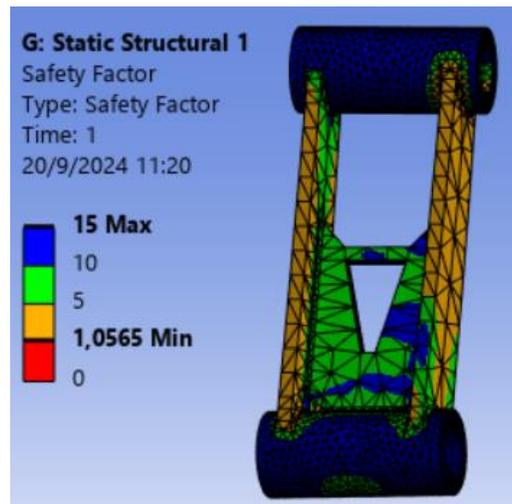


Figura 3.20 Deformación máxima D1-M0

Un aspecto destacado de los resultados es el factor de seguridad, el cual fue calculado en 1,05. Este valor por encima de uno indica que el modelo puede soportar la carga máxima durante las condiciones de trabajo sin experimentar fallos, como se muestra en la figura 62 por lo tanto es modelo es viable y eficaz dentro de un proceso de producción.

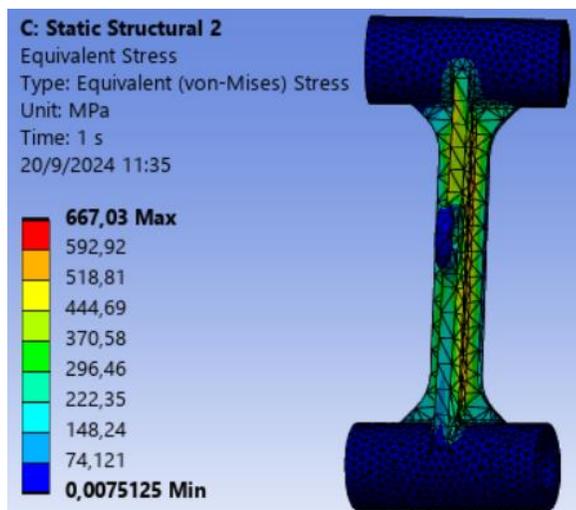


**Figura 3.21** Factor de seguridad D1-M0

### 3.1.9. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 2(D2) CON MATERIAL AISI 1522 (M0)

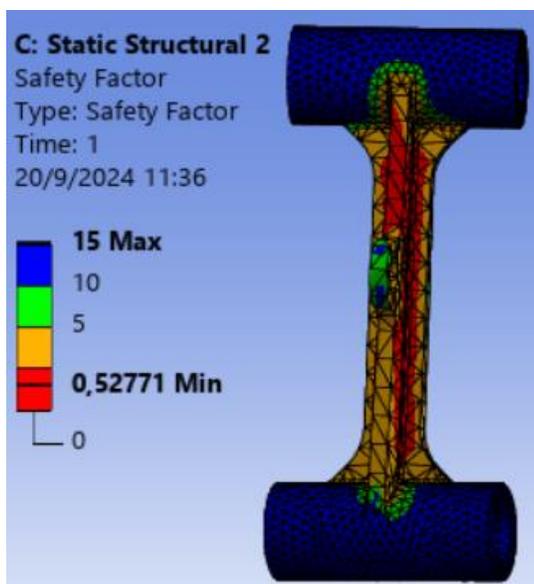
El análisis realizado con el modelo 2 (D2) ha arrojado resultados con un nivel bajo de fiabilidad, mismo que se ha comprobado con valor de esfuerzo mostrado el cual es de 667,03 MPa superando así el límite elástico del material y como consecuencia la obtención de un factor de seguridad de 0,52.

Por lo tanto, dentro de los criterios del diseño mecánico existen dos alternativas para satisfacer el problema de resistencia, una de ellas es generando un nuevo rediseño del elemento, mismo que sea más robusto, con distintos espesores de plancha, y por otro lado es cambiando el material por uno con propiedades mecánicas superiores al original.



**Figura 3.22** Esfuerzo de Von Mises D2-M0

Como se muestra en la figura 3.22, el diseño que nos arroja el módulo de optimización topológica no es viable dentro de un proceso de fabricación, ya que el elemento mecánico cesa de realizar satisfactoriamente la función para el cual fue diseñado, en este caso, al someterse a una condición extrema, es decir a un análisis torsión.



**Figura 3.23** Factor de seguridad D2-M0

### 3.1.10. RESULTADOS DEL CASO ESPECIAL MODELO 2(D2) CON MATERIAL ANTI-ABRASIVO (M1)

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que el esfuerzo máximo registrado fue de 666,41 MPa, un valor inferior al límite elástico del material, lo que indica que el eslabón no fallaría bajo las condiciones de carga simuladas, teniendo en cuenta que para este caso el elemento fue sometido a una carga simétrica y otra asimétrica, es decir, fue puesto a un análisis de compresión y otro de torsión.

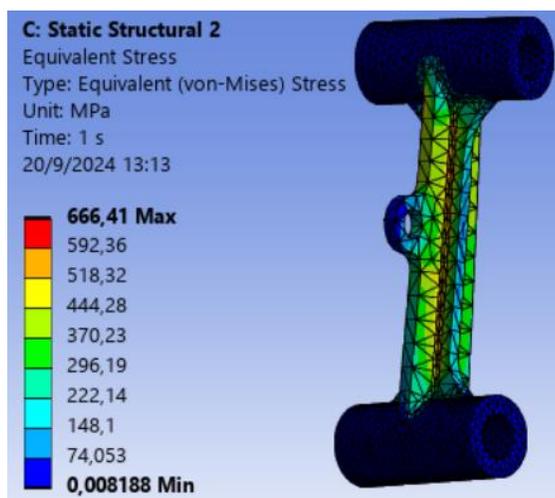


Figura 3.24 Esfuerzo de Von Mises D2-M1

La deformación máxima registrada fue de 8,79 mm, un valor dentro de los rangos aceptables para este tipo de componentes como se muestra en la figura 3.24.

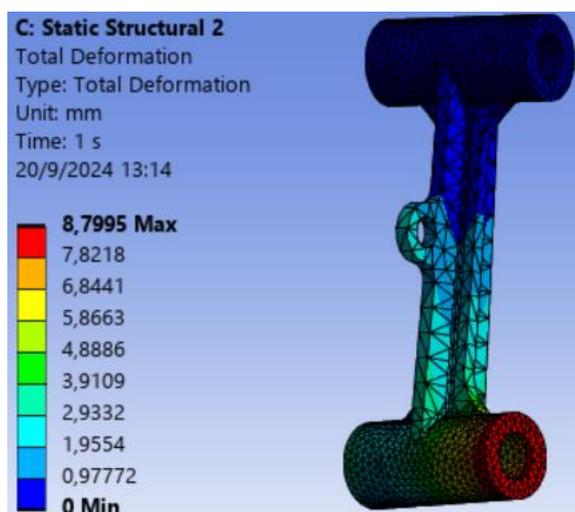
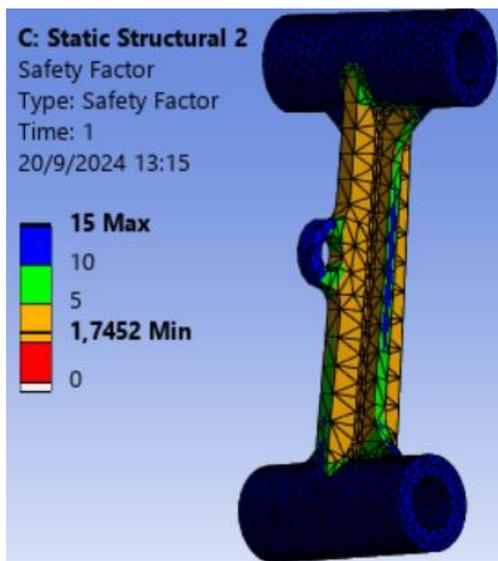


Figura 3.25 Deformación máxima D2-M1

En la figura 3.25 se presenta el factor de seguridad, calculado en 1,74 es un indicador de la capacidad del eslabón para soportar cargas adicionales sin fallar. En este caso, el valor obtenido es significativamente superior a 1, lo que confirma la robustez del diseño, de esta manera se validó por completo el diseño 2 para su operación en condiciones extremas.



**Figura 3.26** Factor de seguridad D2-M1

En condiciones extremas se planteó un escenario en donde la fuerza es asimétrica en el eslabón, como resultado del estudio en la condición extrema de los diferentes modelos y materiales nos arroja un resultado desfavorable en el modelo alternativo 2 con el material original ya que el factor de seguridad es de 0.52 como se muestra en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Comparativa de criterios FEM en condiciones extremas

Modelos	Material	Esfuerzo de Von-Mises (MPa)	Deformación (mm)	Factor de seguridad	Masa (kg)
Alternativo 1	AISI 1522	333.16	2.53	1.05	23.14
Alternativo 2	AISI 1522	667.03	8.68	0.52	19.07
Alternativo 2	Anti-abrasivo	666.41	8.79	1.74	19.88

### 3.2. RESULTADOS DEL PROTOTIPO A PARTIR DE LA IMPRESIÓN 3D

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la impresión realizada a través de manufactura aditiva, de esta manera se presenta una comparativa entre los 3 modelos donde básicamente se diferencian en la cantidad de materia prima utilizada para el modelado de los mismos donde se prioriza la optimización en términos de costos de fabricación y recursos, dentro de ellos uno como elemento original y dos más como propuesta de manufactura ya validados para el área operativa como se muestra en la tabla 3.5.

De esta manera se justifica el apartado CAM propuesto dentro del trabajo de titulación con una presentación de prototipos.

**Tabla 3.5** Presentación de prototipos, diseño original y alternativos

Modelo Original (M0)	Modelo 1 (D1)	Modelo 2 (D2)
		

### 3.3. ANÁLISIS DE COSTOS DE FABRICACIÓN DE UN PROCESO VIABLE

Si bien es cierto, el trabajo de titulación tiene un alcance específico donde se menciona que el proceso de fabricación del caso es un prototipo obtenido a través de manufactura aditiva. Sin embargo, se ha planteado una propuesta viable de fabricación, es decir, la construcción del diseño en tamaño real, teniendo en cuenta los siguientes factores tales como: materia prima,

procesos de fabricación disponibles a nivel local tiempo, con el objetivo de demostrar un estimado con fundamento eficaz previo a su proceso de fabricación.

Por lo tanto, en este apartado se aborda un estimado de las tasas de valoración incluyendo índices económicos dentro de un proceso de fabricación, es decir, valores directos. En ese sentido, se ha considerado variables tales como: materia prima, maquinas herramientas, mano de obra, entre otros factores, inicialmente se se parte del cálculo de materia prima referente a las planchas disponibles a nivel local, como se muestra en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6** Materia prima plancha

Descripción	Dimensiones largo ancho, espesor (m)	vol. (m3)	Densidad (kg/m3)	Cantidad (kg)	Costo por unidad de kg (USD)	Costo Total (USD)
Anti - abrasivo	0,45 x 0,22 x 0,015	0,001485	7850	11,657	3,45	40,25
Anti - abrasivo	0,35 x 0,22 x 0,015	0,001155	7851	9,067	3,45	31,25
					Costo final	71,50

Fuente: (DIPAC MANTA S.A, 2024)

La longitud de los ejes que se compone el mecanismo es de 200 mm por cada lado, es decir, un eje donde se aloja el pistón hidráulico y el otro eje donde se acopla directamente al cucharón para su movimiento, el costo por unidad es de 65 dólares americanos. Sin embargo, se ha estimado el precio de ambos ejes en un solo recuadro, como se muestra en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Materia prima eje

Descripción	Dimensiones largo (mm)	Diámetro interior y exterior (mm)	Costo Total (USD)
Eje perforado	200	45 x 100	130

Fuente: (DIPAC MANTA S.A, 2024)

Dentro de los procesos de fabricación de elementos, piezas cuya aplicación sea específicamente para maquinaria agrícola y pesada existen dos métodos disponibles a nivel local los cuales son: procesos de corte con plasma mediante CNC y el otro llamado oxicorte. Desde un punto de vista técnico y operativo, el corte con plasma tiene ciertas ventajas con respecto al oxicorte, entre ellas se destacan: tiempo, eficiencia, calidad, además de que este tipo de proceso no requiere precalentamiento para su operación, está claro que al ser una máquina herramienta conformada

por una computadora inteligente es más precisa y no requiere el uso de un operador que efectúe movimiento sino más bien que monitoree la interfaz de la máquina.

En términos económicos el proceso de fabricación mencionado tiende a ser competitivo con demás procesos comunes existentes en el mercado, como se muestra en la tabla 3.8.

En ese sentido, se ha priorizado la aplicación del corte con plasma por sus ventajas como un proceso de fabricación viable para la construcción de los modelos.

**Tabla 3.8** Costo de procesos de fabricación Modelo 1 (D1)

Descripción	Proceso	Horas	Costo hora (USD)	Costo final (USD)
<b>Diseño CAD</b>	Modelado del Elemento	6	15	90
<b>Simulación CAE</b>	Análisis de Ingeniería	10	20	200
<b>Mano de obra</b>	Corte con plasma	2	90	180
<b>Mano de obra</b>	Mecanizado en Torno	3	95	285
<b>Mano de obra</b>	Mecanizado con Taladro radial	2	80	160
<b>Mano de obra</b>	Soldadura	6	125	750
			Costo final	1638

Fuente: CELEC EP [47].

Si bien es cierto, dentro de un análisis de costos se consideran todas las variables directas e indirectas que se han generado para la realización del trabajo. No obstante, en el presente trabajo, se presenta un aproximado general del mismo como justificación del proceso de fabricación. Visto de esta manera a continuación se presenta en la tabla 3.9 el costo final de fabricación del modelo 1 (D1) con material acero anti - abrasivo.

**Tabla 3.9** Costo de fabricación del modelo 1(D1) con material Anti- Abrasivo(M1)

Descripción	Costo (USD)
<b>Materia prima total</b>	201,5
<b>Proceso de fabricación</b>	1638
<b>Costo final</b>	<b>1839.5 \$</b>

Por otro lado, en el siguiente apartado se muestra el valor total para la fabricación del modelo 2 Si bien es cierto, se ha planteado un estimado de costos de fabricación teniendo en cuenta dos factores principales, los cuales son materia prima y mano de obra, la materia prima es la misma para este caso, como se muestra en la tabla 3.10. No obstante, en este apartado se muestra un segundo análisis de costos con la única variable que es el modelo.

**Tabla 3.10** Costo de procesos de fabricación Modelo 2(D2)

Descripción	Proceso	Horas	Costo hora (USD)	Costo final (USD)
<b>Diseño CAD</b>	Modelado del Elemento	5	15	75
<b>Simulación CAE</b>	Análisis de Ingeniería	9	20	180
<b>Mano de obra</b>	Corte con plasma	2	90	180
<b>Mano de obra</b>	Mecanizado en Torno	2	95	190
<b>Mano de obra</b>	Mecanizado con Taladro radial	2	80	160
<b>Mano de obra</b>	Soldadura	4	125	500
			Costo final	1285

Fuente: (CELEC EP, 2024).

En este apartado se acota una consideración especial, los valores de materia prima en este caso se aplicó en función de la necesidad de calcularlo con 2 planchas, ya que su geometría está basada en un modelo I debido a que el elemento no posee dos articulaciones, sino más bien un refuerzo lateral en su estructura. En tabla 3.11 se ve reflejado la optimización de recursos, como objetivo de la optimización topológica. Sin embargo, en términos de fiabilidad e índice de seguridad en condiciones extremas, el modelo no satisface trabajo en casos especiales.

**Tabla 3.11** Costo de fabricación del modelo 2(D2) con material Anti-Abrasivo (M1)

Descripción	Costo final (USD)
<b>Materia prima total</b>	170,25
<b>Proceso de fabricación</b>	1285
<b>Costo total</b>	<b>1455.25 \$</b>

## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- El proceso de retro ingeniería se aplicó en un componente mecánico llamado eslabón H de una retroexcavadora CAT modelo 420E, donde inicialmente se partió de la obtención de datos de su geometría, seguido de un análisis cinemático para la definición de solicitudes y requerimientos de esta. Después se aplicó técnicas de diseño mecánico a través de herramientas computacionales CAE que permitan desarrollar nuevos modelos aplicando técnicas de optimización estructural, para la obtención de una nueva alternativa de fabricación, y su presentación final mediante el método de manufactura aditiva.
- Bajo el concepto de ingeniería inversa, se aplicó el método de escaneo tridimensional para la obtención de la geometría CAD. Se usó el escáner Einstar 3D junto con el software ExStar de shining y para modelar el software SolidWorks. Para la obtención de las condiciones de trabajo que requiere el modelo se hizo uso del software ANSYS en el módulo de rigid dynamics, así que se obtuvo la fuerza máxima de operación con un valor de 408,249 KN. Después, se aplicó la carga y sus condiciones de trabajo para el modelo original, basado en un análisis de tipo estático estructural. A partir de allí hizo uso del módulo Optimization topologic teniendo como resultado 2 modelos nuevos mismos que fueron sometidos a una etapa llamada refinación del modelo, para luego validar su rendimiento. Para los dos casos se obtuvo un factor de seguridad de más de 1 mismo que se traduce a que los modelos son viables para su fabricación.
- Los modelos 1 Y 2 obtenidos a través de la optimización topológica cumplieron satisfactoriamente condiciones operativas de trabajo normales. No obstante, el modelo 2 obtenido mediante teoría basada en diseño generativo propuesto como parte del trabajo, no cumplió la aplicación de carga asimétrica, de hecho, los resultados obtenidos a partir del análisis de torsión arrojaron un factor de seguridad de 0,5 mismo que se encuentra por debajo de los límites requeridos, es decir, el modelo 2 no cumple con

solicitudes de trabajo en condiciones extremas, por lo tanto, este diseño no es viable dentro de un proceso de fabricación.

- Se concluye que, la aplicación de la última fase de un proceso tecnológico, en un proyecto académico, el método de manufactura aditiva es ideal, ya que hoy en día se encuentra disponible a nivel local de manera asequible, por consiguiente, se reducen costos, menor cantidad de recursos en su fabricación, y en términos de calidad su presentación es más estética ya que sus acabados tienen un alto índice de precisión al tener un ordenador que lo controle.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para lograr que la propuesta de fabricación teórica se lleve a cabo, se recomienda aplicar procesos de manufactura locales, con ello se pretende minimizar costos con los procesos de fabricación, ya que al encontrarnos en una localidad donde los procesos de manufactura son muy escasos, los usuarios y operadores de las máquinas prefieren reconstruir sus autopartes o a su vez corregir las fallas agregando refuerzos donde el material que usan es poco fiable, por el hecho de no seguir un proceso que contenga un criterio técnico.
- Para futuros trabajos que sigan la misma línea de investigación se recomienda hacer uso del modelo 1, con material Anti-Abrasivo ya que desde un punto de vista ingenieril el factor de seguridad obtenido con un valor 3,75 determina que el diseño tiene un alto nivel de confiabilidad y robustez mismo que satisface aplicaciones en condiciones de trabajo extremas, no solamente se suele someter a compresión o tracción, mientras que el modelo 2 es únicamente aplicable para operaciones de trabajo comunes, por lo tanto no se recomienda su fabricación.
- Para futuros trabajos de investigación en áreas de un centro de investigación, visto desde la metodología que conlleva el diseño mecánico, se recomienda seguir una normativa en la cual mencione con que grado de factor de seguridad se recomienda trabajar, con el objetivo de cumplir las expectativas de una empresa o corporación, ya que en algunos casos no se requiere un alto índice de factor de seguridad ya que va a depender mucho de la naturaleza del componente al que se encuentre sometido, dicho de otra forma, de otra manera un alto índice de FS repercute principalmente en factores directos como: materia prima, mano de obra y tiempo.
- Se recomienda aplicar otros métodos de manufactura aditiva para la presentación de prototipos tales como: estereolitografía o impresión por síntesis de luz digital, para analizar su repercusión en términos estéticos.

## REFERENCIAS

- Aeade, & Autoplus. (2022). *Anuario*. 72.
- AG Electrónica. (n.d.). *CR-6 MAX IMPRESORA 3D DE GRAN TAMAÑO DE IMPRESIÓN CON AUTONIVEL*. <http://www.agelectronica.com>
- Alberto, R., & Hillebrand, C. (2016). *GENERALIDADES E HISTORIA DE LA MAQUINARIA PESADA Electiva II Grupo AD*.
- Alfonso Pámanes, J. G., & Pérez P, S. E. (2011). *Derechos Reservados ANÁLISIS CINETOSTÁTICO DEL MANIPULADOR DE UNA MÁQUINA RETROEXCAVADORA*.
- Ansys. (2024). *Ansys Topology Optimization \_ Lightweighting & Shape Optimization*.
- Archi Expo. (n.d.). *IIASA CAT A Quito, Ecuador IIASA CAT*.  
<https://www.archiexpo.es/prod/caterpillar/product-1995-1755036.html>
- Ardila-Marín, J. G., Hincapié-Zuluaga, D. A., & Sierra-del-Río, J. A. (2016). INDEPENDENCIA DE MALLA EN TUBOS TORSIONADOS PARA INTERCAMBIO DE CALOR: CASO DE ESTUDIO. *Revista de La Facultad de Ciencias*, 5(1), 124–140.  
<https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231>
- Ashby, M. F., Boston, A., London, H., Oxford, Y., San, P., San, D., Singapore, F., & Tokyo, S. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. <http://books.elsevier.com>
- ASM International. Handbook Committee. (2006). *ASM handbook*.
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. (n.d.). *Mecánica de materiales* (Quinta Edición).
- Ben Redwood, F. S. B. G. (2017). *Tecnologías diseños y aplicaciones 3D*.
- Berchon, M., & Luyt, Y. B. (2014). *LA IMPRESIÓN 3D*.
- Carlos, I., Mariño, S., De, D., & De Mecánica, L. F. (2016a). “SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO DE CUCHARONES PARA MAQUINARIA DE MINERÍA.” *INGENIERO AUTOMOTRIZ*.
- Carlos, I., Mariño, S., De, D., & De Mecánica, L. F. (2016b). “SIMULACIÓN DE RECUPERACIÓN POR MÉTODO DE ELEMENTO FINITO DE CUCHARONES PARA MAQUINARIA DE MINERÍA.” *INGENIERO AUTOMOTRIZ*.
- Caterpillar. (2006). *Retroexcavadora Cargadora 420E/420E IT*.
- CELEC EP. (2024). *7.Convocatoria-CAE-ESPECIALISTA*. <https://www.celec.gob.ec/bolsa-de-empleo/>
- CIAUTO. (2019). *Ensambladora CIAUTO*. 3–5.
- Debem. (n.d.). *Método FEM*. <https://sani.debem.com/es/>
- DIPAC MANTA. (2024). *laminadas-en-caliente\_DIPAC*.
- DIPAC MANTA S.A. (2024a). *Planchas-Antiabrasiva DIPAC*.
- DIPAC MANTA S.A. (2024b). *Planchas-Antiabrasiva DIPAC*.
- Edward Shigley, J. (n.d.). *TEORIA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS*.
- Enrique, A., Sánchez, J., Director, E., Javier, D., & Blasco, A. (2017). *Trabajo de final de grado Analysis, design and modeling of the arm of an excavator developing a force of 170 kN at the end of the bucket*.
- Formlabs. (2024a). Comparación de tecnologías de impresión 3D FDM, SLA o SLS. *Formlabs*, 1–11.

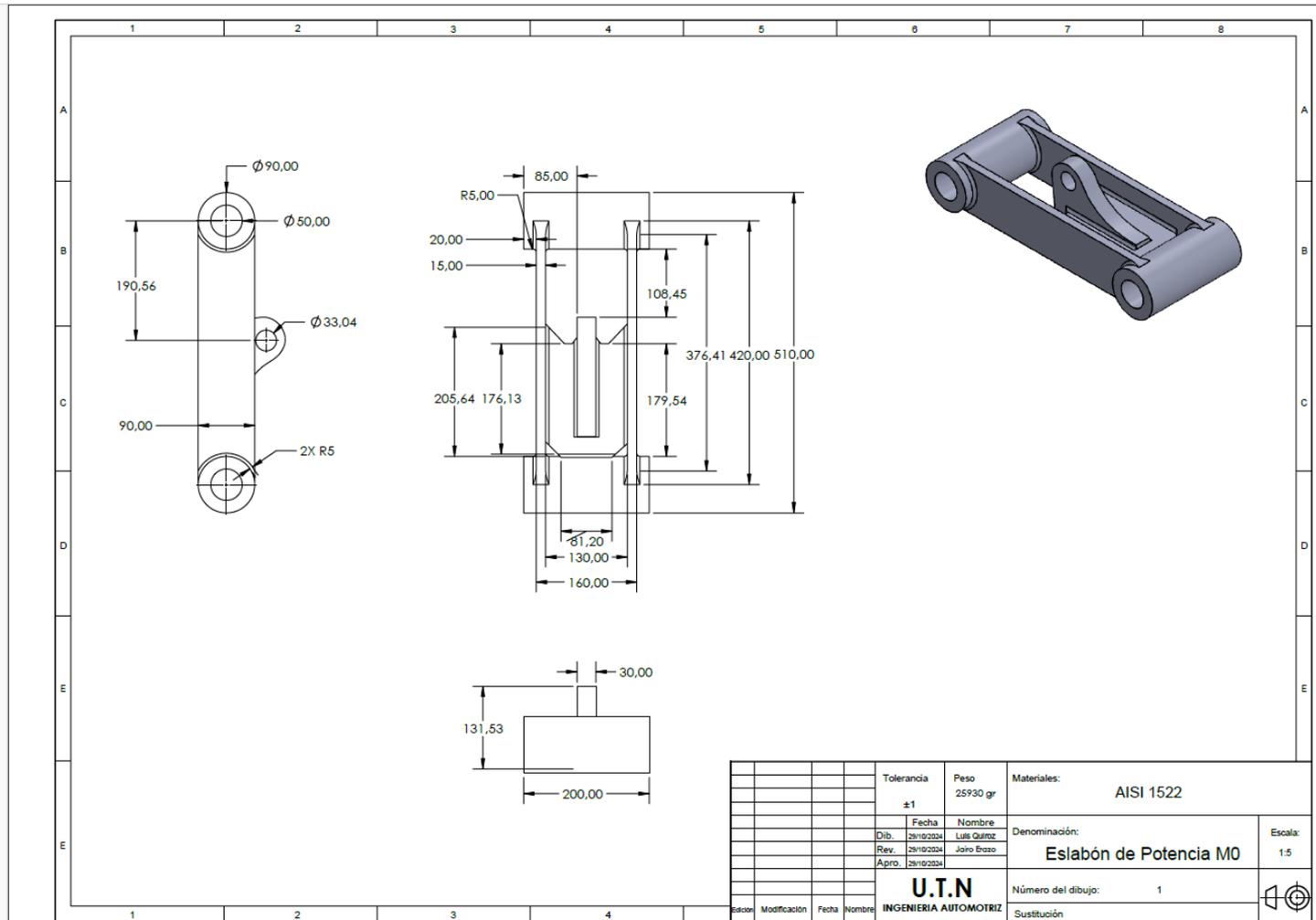
- Formlabs. (2024b). Comparación de tecnologías de impresión 3D FDM, SLA o SLS. *Formlabs*, 1–11. <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>
- INEL. (2019). *Maquinaria Pesada Y Vehículos Operativos*. 1–39.
- Khedkar, Y., Nagpure, H., Dendage, P., Shinde, P., Naikavade, S., & Dey, T. (2022). The evaluation of forces acting on excavator bucket and its capacity. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2591–2596. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.10.013>
- Lee The Timken Co, P. W., Trudel, Y., German, R. M., Eisen Crucible Research, W. B., Moyer Magna Tech, K. P., Labs, M., Madan Winter Inc, D. F., Abkowitz Dynamet Technology, S., Allen, T., Alman, D. E., Banhart Fraunhofer Institute, J., Banyash Dixon Ticonderoga Company, D., Bell DuPont Company, T., Berry OMG Americas, D., Burns Cincinnati Incorporated, R., Byrd Wyman Gordon Forgings, D., Carson Jenike, J., Inc, J., Donaldson Presmet, I., & Dorsch, C. (1998). *Editorial Advisory Board Contributors and Reviewers*.
- MatWeb. (2024). *Advertise with MatWeb! AISI 4140 Steel, annealed at 815°C (1500°F) furnace cooled 11°C (20°F)/hour to 665°C (1230°F), air cooled, 25 mm (1 in.) round*.
- Mora, & Morales, S. (2018). *Fabricación aditiva*.
- Morales, S. (n.d.). *Fabricación aditiva PID\_00253866*.
- Myszka, D. H., Antonio, T., Brito, E., Saldaña, S., Ángel, S., Fernández, H., Zacatenco, P., Nacional, P., Horacio, M., & Garza, A. (n.d.). *MÁQUINAS Y MECANISMOS Cuarta edición*.
- Myszka, D. H., Antonio, T., Brito, E., Saldaña, S., Ángel, S., Fernández, H., Zacatenco, P., Nacional, P., Horacio, M., & Garza, A. (2012). *MÁQUINAS Y MECANISMOS Cuarta edición*.
- Norton, R. L. (2009). *Diseno de Maquinaria*. [www.FreeLibros.me](http://www.FreeLibros.me)
- Palma, M. (2022). *No Title*. 1–45.
- Porrás, R., & Arias-Trujillo. (2016). *El aprendizaje cooperativo como metodología para estudiar las propiedades mecánicas de los materiales en la Ingeniería Civil Universidad de Castilla-La Mancha (España) Cooperative learning as a methodology to learn mechanical properties of materials in Civil Engineering Universidad de Castilla-La Mancha (España)*. 14(2), 37–55.
- Programa de la unión europea. (2017). *GUIA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D - RESUMEN* -. 1–32.
- Ricardo Alberto Chegwin Hillebrand. (2016). *GENERALIDADES E HISTORIA DE LA MAQUINARIA PESADA Electiva II Grupo AD*.
- Richard G. Budynas, J. K. N. (2008). *TEORIA DE MÁQUINAS Y MECANISMOS*.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). Secretaría Nacional de Planificación. In *Secretaría Nacional de Planificación* (pp. 69–71).
- SHINING. (n.d.). *Ficha técnica Einstar Portable Handheld 3D Scanner / New 3D Scanner by SHINING 3D*.
- Solazzi, L., Assi, A., & Ceresoli, F. (2019). Excavator arms: Numerical, experimental and new concept design. *Composite Structures*, 217, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.096>
- SolidWorks. (2011). Introducción a Solidworks. *Solidworks*, 134. <https://bit.ly/2OHqEeu>
- SolidWorks. (2023). *INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS Contents*.

- SOLUCIONES ZENER. (2021, October 4). *Diagramas Cinemáticos*.  
<https://www.solucioneszener.com/post/m%C3%A1quinas-y-mecanismos-1-5>
- Tiktin, Juan., & Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y Puertos. (2013). *Movimiento de tierras : utilización de la maquinaria. Producciones y casos prácticos. Compactación de materiales. Utilización de compactadores*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Yu, C., Bao, Y., & Li, Q. (2021). Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108637>

## **ANEXOS**

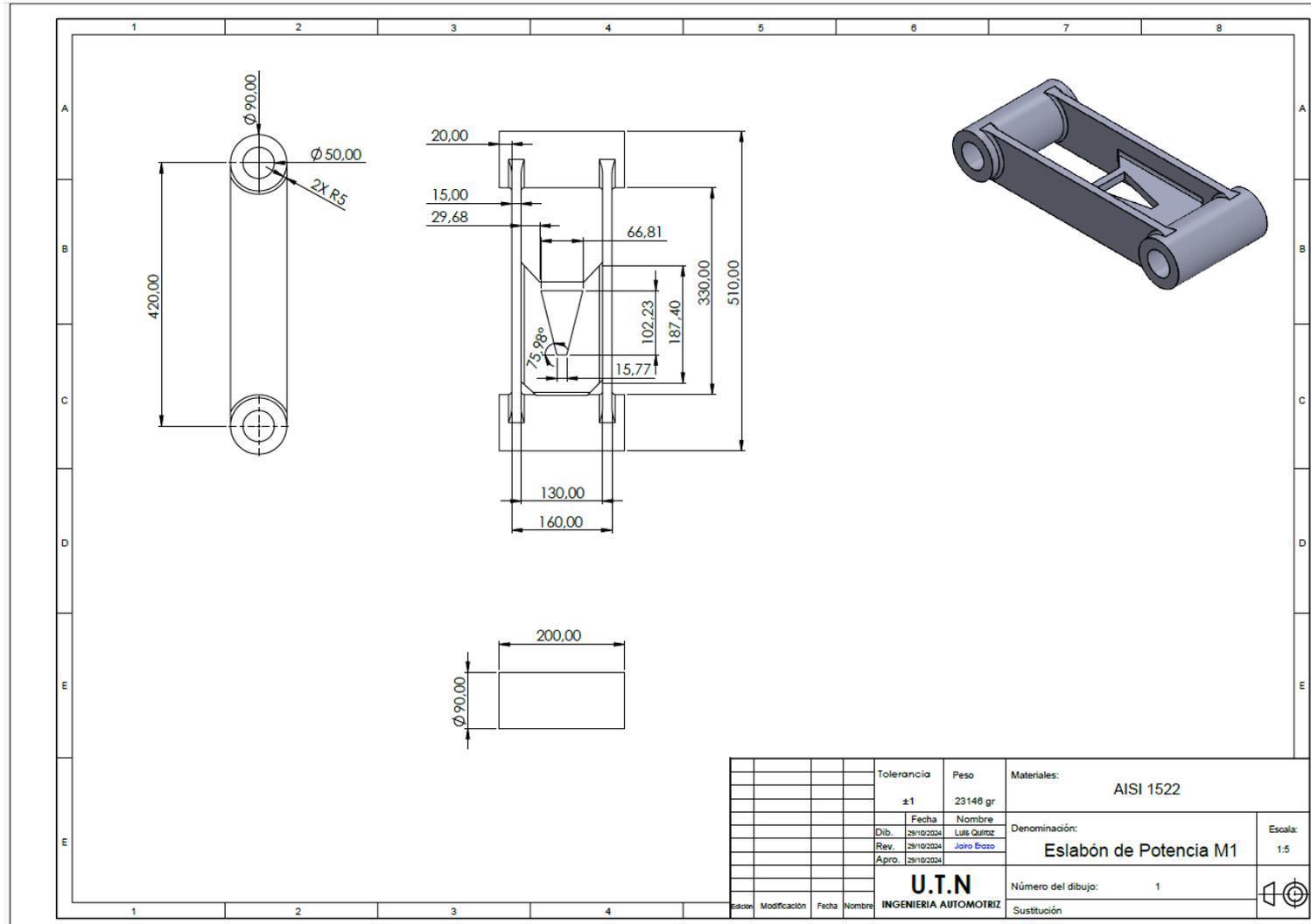
# ANEXO I

## PLANOS DEL MODELO ORIGINAL



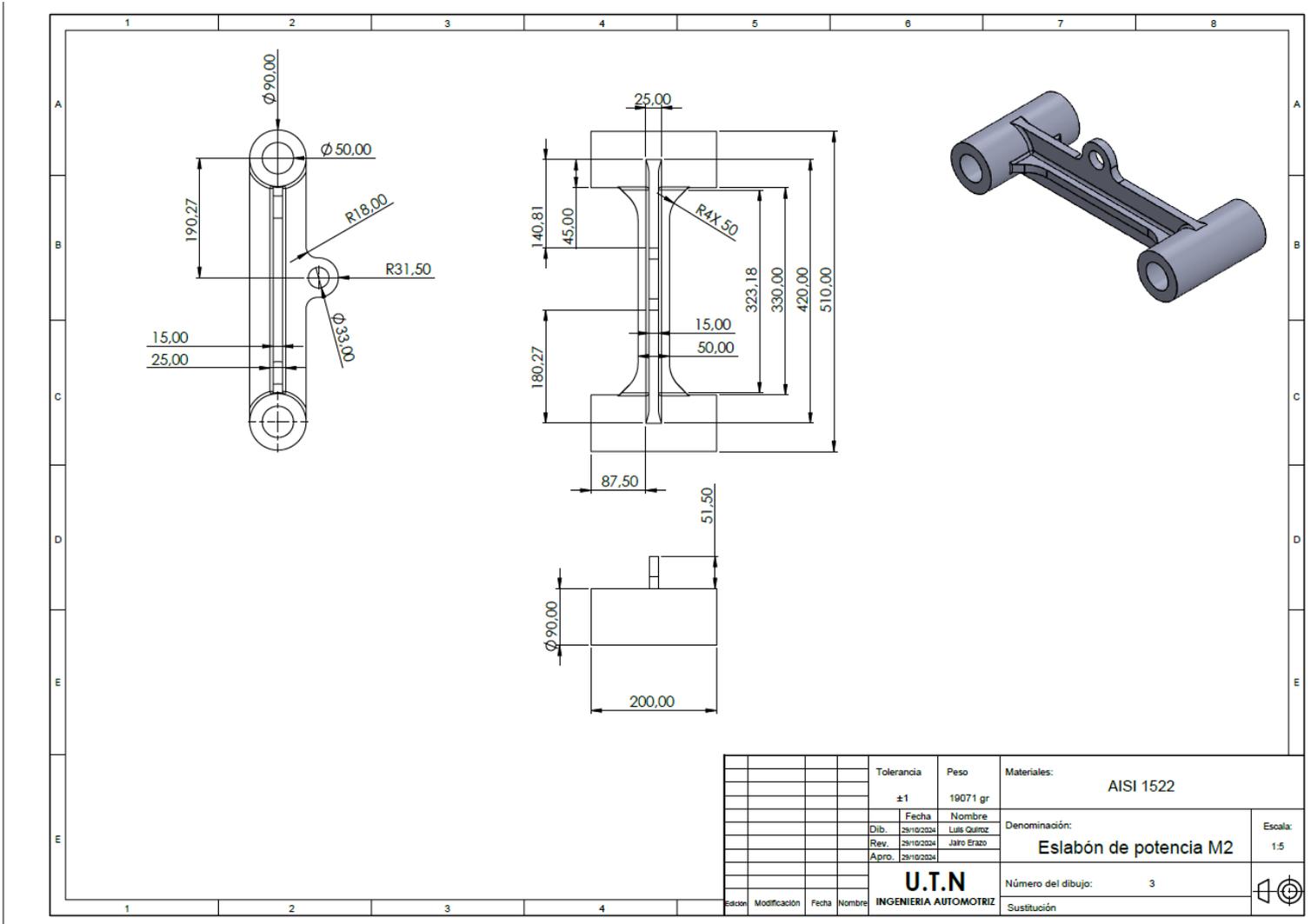
## ANEXO II

### PLANOS DEL MODELO ALTERNATIVO 1



# ANEXO III

## PLANOS DEL MODELO ALTERNATIVO 2



## ANEXO IV

### FICHA TÉCNICA SCANNER 3D

---

<b>DESCRIPTION</b>	▼
<b>TECHNICAL SPECIFICATIONS</b>	▲
<b>PRODUCT VIDEO</b>	▼
<b>DATA GALLERY</b>	▼
<b>SHIPPING POLICY</b>	▼

Scan Mode	Structed Light Scan
Point Distance	0.1 mm ~ 3 mm
Light Source	Infrared VCSEL structured light
Working Distance	Effective Working Distance: 160mm-1400mm; Optimal Working Distance: 400mm
Depth of Field	160-1400mm
Maximum FOV	434mm*379mm (under optimal work distance)

Scan Speed	980,000points/s, up to 14FPS
Align Modes	Feature Alignment, Hybrid Alignment, Texture Alignment, Global Markers
Safety	Eye-safe
Texture Scan	Yes
Outdoor Scanning	Yes
Interface	USB2.0 or above
Output Formats	OBJ; STL; PLY; P3; 3MF
Scanner Size	220mm*46mm*55mm
Carrying Case Size	245mm*245mm*90mm
Scanner Body Weight	500g
Operating Temperature Range	0-40°C
Operating Humidity Range	10-90%
Certifications	CE, FCC, ROHS, WEEE, KC
Recommended Configuration	OS: Win10/11, 64 bit; Graphics card: NVIDIA GTX1060; Video memory: ≥6GB; Processor: I7-11800H; Memory: ≥32GB
Basic Computer Configuration	OS: Win10, 64 bit; Graphics card: NVIDIA GTX1050; Video memory: ≥4GB; Processor: I7-7700H; Memory: ≥16GB

## ANEXO V

### FICHA TÉCNICA IMPRESORA 3D

#### Parámetros del producto

- Tecnología de moldeo: FDM
- Tamaño de impresión: 400\*400\*400mm
- Tamaño de la máquina: 725\*640\*691mm
- Resolución de impresión:  $\pm 0.1$ mm
- Espesor de la capa: 0.1-0.4mm
- Número de boquillas: 1
- Diámetro de la boquilla: 0.4mm como estándar
- Temperatura de la boquilla:  $\leq 260^{\circ}$  C
- Temperatura de la cama caliente:  $\leq 90^{\circ}$  C
- Potencia nominal: 500W
- Pantalla de visualización: Pantalla táctil a color de 4,3 pulgadas
- Fuente de alimentación: Entrada 100-240V; salida 24V
- Transferencia de archivos: USB/Tarjeta de memoria
- Materiales soportados: PLA/TPU/PETG/Madera

 ACOTACIÓN: N/A	<a href="http://www.agelectronica.com">http://www.agelectronica.com</a>	ESCALA: N/A	REALIZO: OAH
		REV: JFRR	
TOLERANCIA: N/A	<b>IMPRESORA 3D DE GRAN TAMAÑO DE IMPRESIÓN CON AUTONIVEL</b>		
TOLERANCIA: N/A	Fecha: 05/04/22	<b>No. Parte: CR-6 MAX</b>	

## ANEXO VI

## FICHA TÉCNICA RETROEXCAVADORA

**Motor**

Modelo del motor	3054C DIT	
Potencia bruta – SAE J1995	69 kW	93 hp
Potencia bruta – ISO 14396	68 kW	92 hp
Potencia neta – SAE J1349	66 kW	89 hp
Potencia neta – ISO 9249	67 kW	90 hp
Potencia neta – EEC 80/1269	67 kW	90 hp
Calibre	105 mm	4,13 pulg
Carrera	127 mm	5 pulg
Cilindrada	4,4 L	268 pulg <sup>3</sup>
Reserva de par neta a 1.400 rpm	37%	
Par máximo neta a 1.400 rpm – SAE J1349	386 N•m	285 lb pie

- Las nuevas clasificaciones de potencia se aplican a 2.200 rpm cuando se someten a prueba en las condiciones indicadas para la norma especificada.
- La potencia neta anunciada es la potencia disponible en el volante cuando el motor está equipado con ventilador, filtro de aire, silenciador y alternador.
- Con base en condiciones de aire estándar de 25° C (77° F) y 99 kPa (29,32 pulg) en barómetro seco.
- Se usó un combustible de peso específico API de 35° con un poder calorífico inferior de 42.780 kJ/kg (18.390 Btu/lb) cuando se usa a 30° C (89° F) [referida a una densidad de combustible de 839 g/L (7 lb/gal de EE.UU.)]
- Sólo requiere reducción de potencia en altitudes mayores que 2.286 m (7.500 pies)
- La reserva de par neta cumple con la norma SAE J1349.

**Pesos**

Peso en orden de trabajo – Nominal	7.025 kg	15.474 lb
Peso en orden de trabajo – Máximo	10.700 kg	23.568 lb
Cabina, estructura ROPS/FOPS	225 kg	496 lb
Transmisión automática	38 kg	84 lb
Control de amortiguación	25 kg	55 lb
Aire acondicionado	38 kg	84 lb
Tracción en las cuatro ruedas	155 kg	342 lb
Cucharón de uso múltiple 0,96 m <sup>3</sup> (1,25 yd <sup>3</sup> ) con horquilla plegable	884 kg	1.949 lb
Cucharón de uso múltiple 0,96 m <sup>3</sup> (1,25 yd <sup>3</sup> ) sin horquilla plegable	462 kg	1.019 lb
Cargador IT con acoplador rápido	338 kg	745 lb
Brazo extensible (sin contrapesos)	270 kg	595 lb
Contrapesos (Opción 1)	116 kg	255 lb
Contrapesos (Opción 2)	231 kg	510 lb
Contrapesos (Opción 3)	488 kg	1.075 lb

- El peso bruto total de la máquina no debe ser mayor que 10.700 kg (23.568 lb).

**Retroexcavadora**

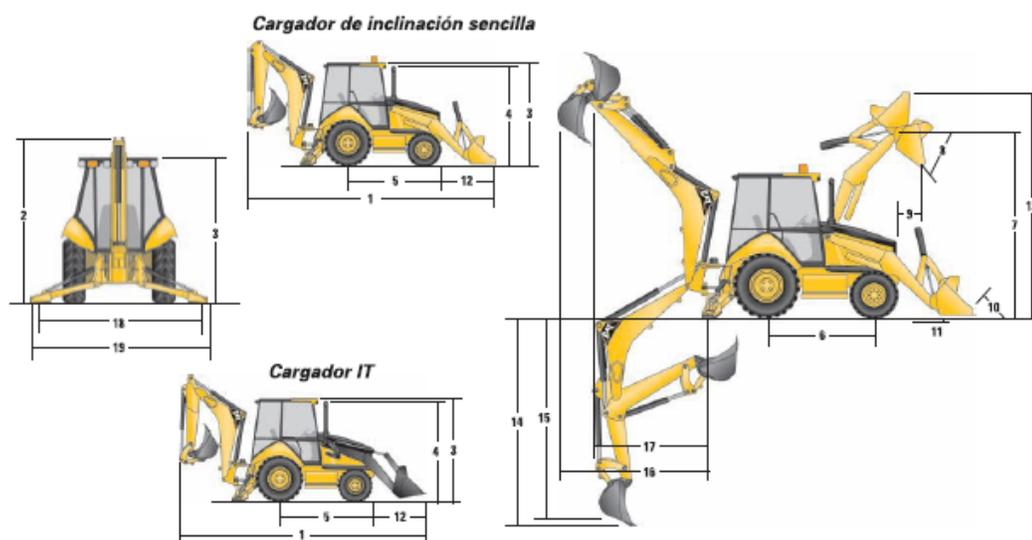
Profundidad de excavación – Estándar	4.360 mm	14,3 pie
Brazo extensible retraído	4.402 mm	14,4 pie
Brazo extensible extendido	5.456 mm	17,9 pie
Alcance desde el pivote de rotación – Estándar	5.618 mm	18,4 pie
Brazo extensible retraído	5.657 mm	18,58 pie
Brazo extensible extendido	6.666 mm	21,833 pie
Rotación del cucharón	205 Grados	
Fuerza de excavación del cucharón – Estándar	61,7 kN	13.875 lb
Brazo extensible retraído	60,9 kN	13.863 lb
Brazo extensible extendido	60,9 kN	13.863 lb
Fuerza de excavación del brazo – Estándar	43 kN	9.662 lb
Brazo extensible retraído	42,8 kN	9.616 lb
Brazo extensible extendido	31,2 kN	7.023 lb
Levantamiento del brazo a 2.440 mm (8 pies) – Estándar	2.601 kg	5.722 lb
Brazo extensible retraído	2.408 kg	5.298 lb
Brazo extensible extendido	1.620 kg	3.564 lb
Altura de carga – estándar	3.636 mm	11,9 pie
Brazo extensible retraído	3.577 mm	11,75 pie
Brazo extensible extendido	4.145 mm	13,583 pie
Alcance de carga – estándar	1.768 mm	5,8 pie
Brazo extensible retraído	1.868 mm	6,166 pie
Brazo extensible extendido	2.771 mm	9,083 pie

**Cargador**

Capacidad del cucharón – Uso General	0,96 m <sup>3</sup>	1,25 yd <sup>3</sup>
Ancho del cucharón – Uso General	2.262 mm	7,4166 pie
Altura de descarga a ángulo máximo – inclinación sencilla	2.573 mm	8,4 pie
Altura de descarga a ángulo máximo – IT con acoplador rápido	2.507 mm	8,25 pie
Alcance de descarga a ángulo máximo – inclinación sencilla	853 mm	2,8 pie
Alcance de descarga a ángulo máximo – IT con acoplador rápido	831 mm	2,75 pie
Profundidad de excavación – inclinación sencilla	106 mm	4 pulg
Profundidad de excavación – IT con acoplador rápido	147 mm	6 pulg
Capacidad de levantamiento a altura máxima – inclinación sencilla	3.196 kg	7.046 lb
Capacidad de levantamiento a altura máxima – IT con acoplador rápido	3.468 kg	7.646 lb
Fuerza de desprendimiento del cucharón – inclinación sencilla	54,5 kN	12.250 lb
Fuerza de desprendimiento del cucharón – IT con acoplador rápido	51,3 kN	11.523 lb

## Dimensiones y rendimiento de la retroexcavadora

	Brazo estándar	Brazo extensible retraído	Brazo extensible extendido
(14) Profundidad de excavación, SAE (máx)	4.360 mm/14 pies 4 pulg	4.402 mm/14 pies 5 pulg	5.456 mm/17 pies 11 pulg
(15) Profundidad de excavación, fondo plano de 2 pies	4.321 mm/14 pies 2 pulg	4.363 mm/14 pies 4 pulg	5.420 mm/17 pies 9 pulg
Alcance desde la línea central del eje trasero a la línea de suelo	6.721 mm/22 pies 1 pulg	6.760 mm/22 pies 2 pulg	7.769 mm/25 pies 6 pulg
(16) Alcance desde el pivote de rotación a la línea de suelo	5.618 mm/18 pies 5 pulg	5.657 mm/18 pies 7 pulg	6.666 mm/21 pies 10 pulg
Altura máxima de operación	5.523 mm/18 pies 1 pulg	5.555 mm/18 pies 3 pulg	6.302 mm/20 pies 8 pulg
Altura de carga	3.636 mm/11 pies 11 pulg	3.577 mm/11 pies 9 pulg	4.145 mm/13 pies 7 pulg
(17) Alcance de carga	1.768 mm/5 pies 10 pulg	1.868 mm/6 pies 2 pulg	2.771 mm/9 pies 1 pulg
Arco de rotación	180°	180°	180°
Rotación del cucharón	205°	205°	205°
(18) Distancia entre estabilizadores, posición de operación (centro)	3.310 mm/10 pies 10 pulg	3.310 mm/10 pies 10 pulg	3.310 mm/10 pies 10 pulg
(19) Distancia entre estabilizadores, posición de operación (exterior)	3.770 mm/12 pies 4 pulg	3.770 mm/12 pies 4 pulg	3.770 mm/12 pies 4 pulg
Separación entre estabilizadores, posición de transporte	2.322 mm/7 pies 7 pulg	2.322 mm/7 pies 7 pulg	2.322 mm/7 pies 7 pulg
Fuerza de excavación del cucharón	61,7 kN/13.875 lb	60,9 kN/13.863 lb	60,9 kN/13.863 lb
Fuerza de excavación del brazo	43,0 kN/9.662 lb	42,8 kN/9.616 lb	31,2 kN/7.023 lb



## ANEXO VII

## CATÁLOGO DE PLANCHAS

## PLANCHAS LAMINADAS AL CALIENTE

### Especificaciones Generales:

<b>Norma:</b>	NTE INEN 115
<b>Espesores:</b>	ASTM A36 - SAE J 403 1008
<b>Espesores:</b>	2mm a 12mm
<b>Rollos:</b>	Ancho 1000, 1220, 1500mm
<b>Planchas:</b>	4 x 8 pies y medidas especiales
<b>Acabado:</b>	Acero Negro



### Calidad Comercial

Calidad	Composición Química							Propiedades Mecánicas			
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%AL	%CU	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alargamiento %	Doblado 180°	Norma Equivalente
JIS G3131 SPHC	0,08 0,13	0,3 0,6	0,02 max	0,025 max	0,05 max	0,02 0,08	0,2 max	270 min	29 min	0= Oe	SAE 1010 ASTM A-569
SAE 1008	0,03 0,1	0,25 0,5	0,02 max	0,025 max	0,04 max	0,02 0,08	0,2 max				JIS G3132 SPHT1
SAE 1012	0,1 0,15	0,3 0,6	0,02 max	0,025 max	0,03 max	0,02 0,08	0,2 max				ASTM A-635 ASTM A-570 GRADO 33

### Calidad Estructural

Norma	Composición Química							Propiedades Mecánicas				
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%CU	OTROS	Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alarga- miento %	Doblado 180°	Norma Equivalente
ASTM A-588M Grado A	0,19 max	0,8 1,25	0,04 max	0,05 max	0,3 0,6	0,25 0,40	Ni 0,15-0,35 Cr 0,40-0,65 V 0,02-0,10	345 min	485 min	18 min		
ASTM A-283 Grado C	0,12 0,18	0,3 0,6	0,025 max	0,03 max	0,04 max	0,2 max		205 min	380 516 max	25 min	0=1,5e	SAE 1015
JIS G-3101 5541 M	0,17 0,23	0,3 0,6	0,025 max	0,025 max	0,04 max	0,25 max		250 min	400 min 550 max	21 min		SAE 1020 ASTM A-36 ASTM A-570 GRADO 36
A 36	0,25	0,80	0,04	0,05	0,4	0,20		250	400 min	20		

## ANTI-ABRASIVA



### Especificaciones Generales:

<b>Calidad:</b>	Plancha aleada
<b>Dureza:</b>	400 HB y 500 HB
<b>Espesores:</b>	En 400 HB de 5mm a 20mm En 500 HB de 12mm a 25mm
<b>Dimensiones:</b>	2000 x 6000

\* Oxicrotes según medidas específicas (oxicrotes se realizarán de acuerdo a la disponibilidad del producto)

#### Descripción:

- Mayor resistencia a la corrosión que otros aceros al carbono.
- Disponible en presentación de Acero Negro, dureza 400HB y 500HB.
- Formato estándar de 2000 x 6000 mm.
- Útil para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos tales como tolvas de volquetes, cucharas de máquinas cargadoras, etc.

#### Aplicaciones:

Para elementos de movimiento de tierra, minerales y materiales abrasivos tales como las tolvas de volquetes, cucharas de máquinas cargadoras, elementos de máquinas trituradoras, chancadoras y prensas de chatarra. También para construcciones soldadas que requieren alta resistencia y buena dureza a baja temperatura.

Para realizar trabajos de soldadura en la misma se recomienda utilizar procesos bajo en hidrogeno, los electrodos deben estar completamente secos, la plancha libre de grasa o aceites. Precalear a 150 - 200°, remover la escoria entre cada cordón de soldadura. Se recomienda electrodos UTP 6020 UTP65.

En caso de requerir corte por oxiacetileno no presenta dificultades, en espesores de hasta 25mm se debe precalear a a 60°C y en caso de espesores mayores se debe precalear a 150°C.

#### COMPOSICIÓN QUÍMICA (Max)

DUREZA	C	Si	Mn	Cr	Ti	B
400 HB	0.26	0.55	1.6	0.4	0.02	0.004
500 HB	0.36	0.55	1.6	0.8	0.02	0.004

#### PROPIEDADES MECÁNICAS (Max)

	Resistencia Mecánica	Punto de Frecuencia
DUREZA	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
400 HB	1316	1163
500 HB	1449	1449

DUREZA	ESPEORES (mm)
400 HB	5,6,10, 12, 19, 20
500 HB	12, 25

## ANEXO VIII

### PROPIEDADES MECÁNICAS DEL EJE

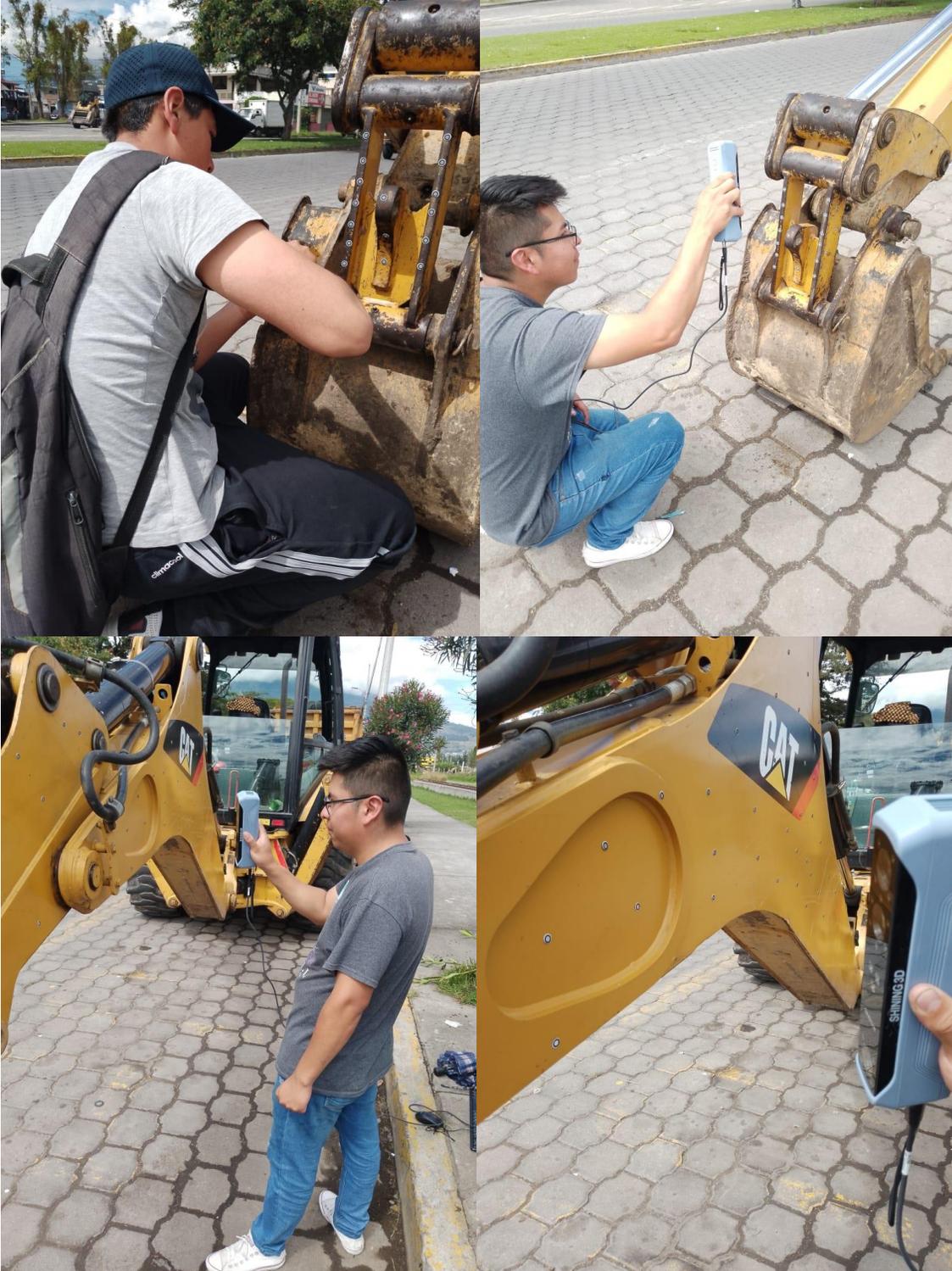


#### Propiedades Mecánicas

		Resistencia a la tensión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Punto de cedencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	% Elongación en 50.8 m.m.	% Reducción de área	Dureza Brinell
Recocido (810°C)	1"Ø	7595	4815	22	50	217
Normalizado (870°C)						
	1"Ø	13045	8790	12	36	363
	2"Ø	12430	8050	13	37	341
	4"Ø	11320	7245	13	36	321
Templado (800°C) Y Revenido (540°C)						
	1"Ø	12900	11675	14	46	352
	2"Ø	11955	11215	16	55	341
	4"Ø	11585	10215	15	53	331

# ANEXO IX

## ESCANEO 3D



## ANEXO X

## TABLA CÁLCULO DE FUERZA MÁXIMA

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2		Datos										
3		P = 61,7KN	61,7									
4						$F_H = \frac{P \cos \beta (d_{Py}) - P \sin \beta (d_{Px})}{\cos \alpha (d_{Hy}) - \sin \alpha (d_{Hx})}$						
5		82,54	77,15									
6		POSICIÓN 1	POSICIÓN 2									
7	1,44059476	a = 82,54°	a = 77,15°	1,34652152								
8		dhx = 0,27 m	dhx = 0,07 m									
9		dhy = 0,22 m	dhy = 0,34 m									
10		dpx = 0,55 m	dpx = 0,94 m									
11		dpy = 0,77 m	dpy = 0,15 m									
12				POSICIÓN1	POSICIÓN 2							
13		0	0	-198,656775	64,3321778							
14		1	0,01745329	-196,150062	71,3582879							
15		2	0,03490659	-193,5836	78,3626616							
16		3	0,05235988	-190,958171	85,3431653							
17		4	0,06981317	-188,274574	92,2976726							
18		5	0,08726646	-185,533627	99,2240652							
19		6	0,10471976	-182,736164	106,120233							
20		7	0,12217305	-179,883038	112,984076							
21		8	0,13962634	-176,975118	119,813503							
22		9	0,15707963	-174,01329	126,606433							
23		10	0,17453293	-170,998456	133,360798							
24		11	0,19198622	-167,931533	140,074539							
25		12	0,20943951	-164,813458	146,745613							
26		13	0,2268928	-161,645178	153,371987							
27		14	0,2443461	-158,42766	159,951642							
28		15	0,26179939	-155,161883	166,482574							
29		16	0,27925268	-151,848842	172,962794							

Hoja1

Hoja3

Hoja2



B	C	D	E	F
69	1,20427718	61,2806907	399,425966	
70	1,22173048	65,3955995	400,838397	
71	1,23918377	69,4905881	402,128728	
72	1,25663706	73,5644092	403,296568	
73	1,27409035	77,6158219	404,341559	
74	1,29154365	81,643592	405,263384	
75	1,30899694	85,6464927	406,061761	
76	1,32645023	89,6233047	406,736449	
77	1,34390352	93,5728165	407,28724	
78	1,36135682	97,4938252	407,713968	
79	1,37881011	101,385136	408,016502	
80	1,3962634	105,245564	408,194751	
81	1,41371669	109,073934	408,248659	
82	1,43116999	112,869078	408,178211	
83	1,44862328	116,629842	407,983428	
84	1,46607657	120,355078	407,664369	
85	1,48352986	124,043654	407,221132	
86	1,50098316	127,694444	406,653851	
87	1,51843645	131,306338	405,9627	
88	1,53588974	134,878235	405,147888	
89	1,55334303	138,409046	404,209664	
90	1,57079633	141,897696	403,148314	
91	1,58824962	145,343123	401,964161	
92	1,60570291	148,744277	400,657567	
93	1,6231562	152,100123	399,228927	
94	1,6406095	155,409637	397,678679	
95	1,65806279	158,671811	396,007294	
96	1,67551608	161,885653	394,215282	
97	1,69296937	165,050183	392,303188	

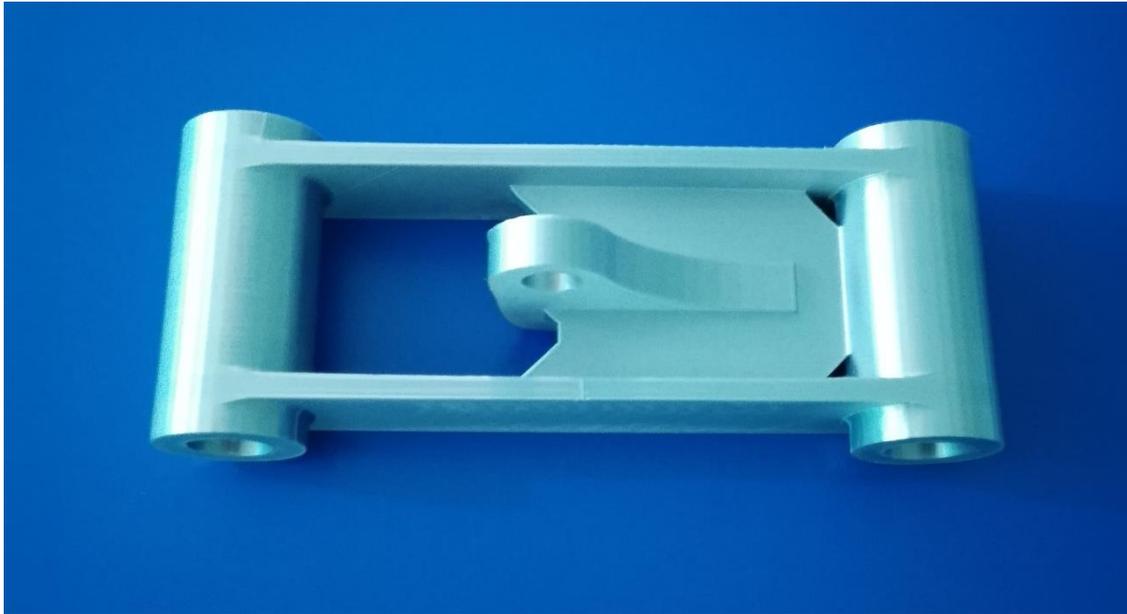
## ANEXO XI

### IMPRESORA 3D EN LA CUAL SE REALIZÓ LOS PROTOTIPOS



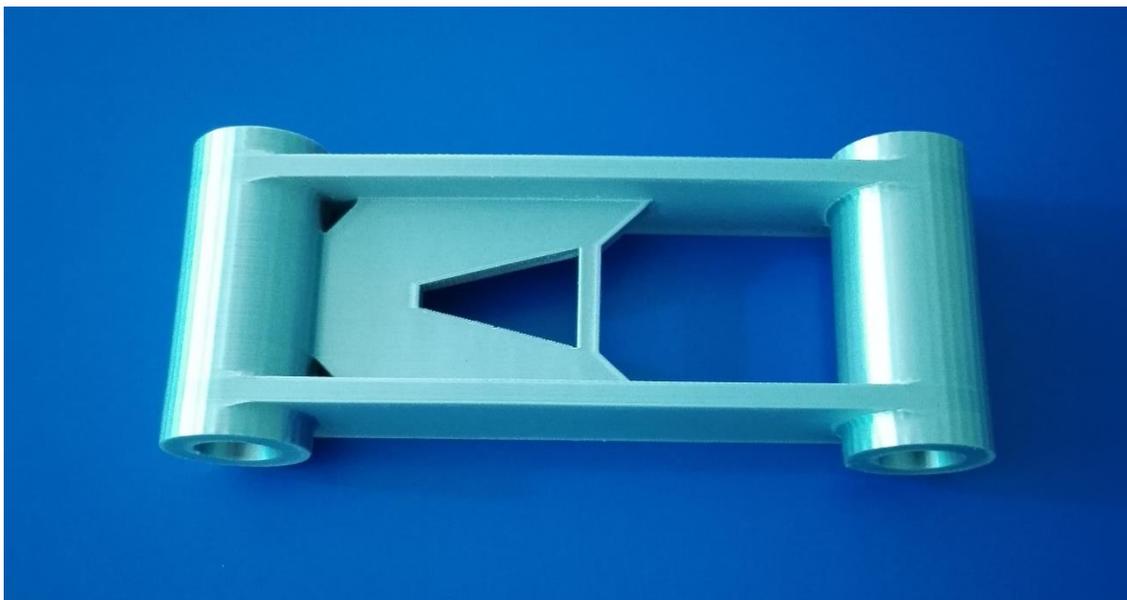
**ANEXO XII**

**PROTOTIPO MODELO ORIGINAL**



**ANEXO XIII**

**PROTOTIPO MODELO ALTERNATIVO 1**



## ANEXO XIV

### PROTOTIPO MODELO ALTERNATIVO 2

