



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA FOPS PARA UNA EXCAVADORA  
HYUNDAI MODELO HX220S, MEDIANTE EL MÉTODO DE  
ELEMENTOS FINITOS, AÑO 2024.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

**AUTOR: OSCAR DAVID CALERO SABANDO**

**TUTOR: DIEGO ANDRÉS DUQUE SARMIENTO**

Quito - Ecuador

2025

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Oscar David Calero Sabando con documento de identificación N° 1725977696 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

Oscar David Calero Sabando

1725977696

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo Oscar David Calero Sabando con documento de identificación No.1725977696, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Diseño y Simulación de un Sistema FOPS para una Excavadora Hyundai modelo HX220S, mediante el Método de Elementos Finitos, año 2024”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 26 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

Oscar David Calero Sabando

1725977696

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Andrés Duque Sarmiento con documento de identificación N° 1900611003, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA FOPS PARA UNA EXCAVADORA HYUNDAI MODELO HX220S, MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, AÑO 2024, realizado por Oscar David Calero Sabando con documento de identificación N° 1725977696, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del año 2025

Atentamente,



---

Ing. Diego Andrés Duque Sarmiento MSc.

1900611003

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco, en primer lugar, a Dios por la salud, el bienestar y la sabiduría que me permitieron culminar esta etapa.

Expreso mi más sincera gratitud al Ing. Diego Duque, director de mi trabajo de titulación, por su invaluable guía, paciencia y conocimientos, que fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. Sus aportes no solo enriquecieron este trabajo, sino también mi aprendizaje como profesional.

A mi familia, especialmente a mis padres, les agradezco profundamente su sacrificio y apoyo incondicional durante esta etapa de mi vida. Gracias por todo su amor y, sobre todo, por creer en mí.

¡Gracias totales!

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
PROBLEMA .....	4
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos. ....	5
MARCO TEÓRICO.....	6
1.1    Excavadora: definición y riesgos en la operación.....	6
1.1.1    Excavadora Hyundai HX220S.....	7
1.2    ISO 3449.....	9
1.3    Estructuras de protección .....	9
1.3.1    Estructura de protección FOPS.....	9
1.4    Volumen de límite de deflexión (DLV).....	9
1.5    Esfuerzos y deformaciones.....	10
1.6    Elementos finitos.....	11
1.6.1    Discretización.....	11
1.6.2    Mallado.....	12
1.6.3    ANSYS.....	12
CAPITULO 1 .....	13
ANÁLISIS DE NORMATIVA .....	13
1.1    Niveles de pruebas de impacto .....	13
1.1.1    Protección contra impacto nivel I.....	13
1.1.2    Protección contra impacto nivel II.....	15
1.2    Procedimiento de prueba para FOPS nivel II.....	16
1.2.1    Caso de prueba 1 .....	17
1.2.2    Caso de prueba 2 .....	17
1.2.3    Caso de prueba 3 .....	18
1.3    Volumen de límite de deflexión (DLV) para prueba FOPS.....	19
1.4    Material .....	20
1.5    Requisitos de desempeño .....	21
CAPITULO 2 .....	22
DISEÑO ESTRUCTURAL FOPS.....	22
2.1    Autodesk Inventor .....	22

2.1.1	Ventajas .....	23
2.2	Objetivos del diseño .....	25
2.3	Datos Iniciales .....	26
2.4	Diseño Conceptual .....	27
2.5	Modelado 3D .....	28
CAPITULO 3 .....		30
SIMULACIONES DE CARGA Y ESFUERZOS .....		30
3.1	Proceso de simulación .....	31
3.2	Estructura .....	31
3.3	Datos de ingeniería .....	31
3.3.1	Acero ASTM A36 .....	32
3.3.2	Acero ASTM A570 grado 36 .....	33
3.3.3	Acero 304 .....	34
3.4	Geometría .....	35
3.5	Modelo .....	35
3.6	Configuración .....	37
3.7	Soluciones .....	39
3.7.1	Deformación total .....	39
3.7.2	Esfuerzo equivalente .....	39
3.7.3	Factor de seguridad .....	40
3.8	Resultados .....	40
3.8.1	Deformación total – Acero ASTM A36 .....	41
3.8.2	Esfuerzo equivalente – Acero ASTM A36 .....	41
3.8.3	Factor de seguridad – Acero ASTM A36 .....	42
3.8.4	Deformación total – ASTM A570 grado 36 .....	43
3.8.5	Esfuerzo equivalente – ASTM A570 grado 36 .....	43
3.8.6	Factor de seguridad – ASTM A570 grado 36 .....	44
3.8.7	Deformación total – Acero 304 .....	44
3.8.8	Esfuerzo equivalente – Acero 304 .....	45
3.8.9	Factor de seguridad – Acero 304 .....	46
3.9	Análisis de convergencia .....	46
CAPÍTULO 4 .....		48
REDISEÑO ESTRUCTURAL .....		48
4.1	Criterios de rediseño .....	48

4.2 Simulación y resultados del rediseño .....	48
CONCLUSIONES .....	52
RECOMENDACIONES .....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. ....	54
ANEXOS. ....	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Excavadora Hyundai HX220S.....	7
<b>Figura 2:</b> Dimensiones Hyundai HX220S.....	8
<b>Figura 3:</b> Perspectiva de DLV para pruebas de impacto .....	9
<b>Figura 4:</b> Curva de esfuerzo y deformación para el modelo de cálculo .....	10
<b>Figura 5:</b> Ejemplo de discretización de un medio continuo en elementos finitos de propiedades conocidas. ....	11
<b>Figura 6:</b> Curva de requerimiento energético de nivel I.....	13
<b>Figura 7:</b> Objeto de prueba Nivel I.....	14
<b>Figura 8:</b> Curva de requerimiento energético de nivel II .....	15
<b>Figura 9:</b> Objeto de prueba Nivel II .....	16
<b>Figura 10:</b> Puntos de interés del caso 1 .....	17
<b>Figura 11:</b> Puntos de interés del caso 2 .....	18
<b>Figura 12:</b> Puntos de interés del caso 3 .....	18
<b>Figura 13:</b> Perspectiva del DLV redondeado y plano agregado para pruebas FOPS.....	19
<b>Figura 14:</b> Dimensiones DLV ortogonal redondeado .....	20
<b>Figura 15:</b> Flujograma de la metodología de trabajo .....	22
<b>Figura 16:</b> Parámetros de diseño .....	23
<b>Figura 17:</b> Parámetros de diseño .....	24
<b>Figura 18:</b> Parámetros de diseño .....	24
<b>Figura 19:</b> Parámetros de diseño .....	24
<b>Figura 20:</b> Parámetros de diseño .....	25
Figura 21: Cabina de Excavadora HX220S.....	26
<b>Figura 22:</b> Estructura FOPS instalada .....	27
<b>Figura 23:</b> Boceto inicial 2D parametrizado de la estructura superior.....	28
<b>Figura 24:</b> modelado 3D estructura superior.....	29
<b>Figura 25:</b> modelado 3D estructura superior.....	29
<b>Figura 26:</b> Modelado 3D estructura interna .....	29
<b>Figura 27:</b> Project Schematic de simulación - ANSYS.....	31
<b>Figura 28:</b> Acero ASTM A36.....	32
<b>Figura 29:</b> Propiedades de los materiales.....	32
<b>Figura 30:</b> Propiedades de los materiales .....	33
<b>Figura 31:</b> Propiedades Acero ASTM A36 .....	33
<b>Figura 32:</b> Propiedades ASTM A570 grado 36.....	34
<b>Figura 33:</b> Propiedades acero 304 .....	34
<b>Figura 34:</b> Detalles de malla.....	35
<b>Figura 35:</b> Detalles del mallado .....	36

<b>Figura 36:</b> Calidad de malla – Métrica: (Element Quality).....	37
<b>Figura 37:</b> Área y dirección de la fuerza aplicada.....	38
<b>Figura 38:</b> Puntos fijos de la estructura.....	38
<b>Figura 39:</b> Deformación total .....	41
<b>Figura 40:</b> Resultado esfuerzo Von Mises .....	41
<b>Figura 41:</b> Resultado factor de seguridad.....	42
<b>Figura 42:</b> Deformación total .....	43
<b>Figura 43:</b> Esfuerzo Von Mises.....	43
<b>Figura 44:</b> Factor de seguridad.....	44
<b>Figura 45:</b> Deformación total .....	44
<b>Figura 46:</b> Esfuerzo Von Mises.....	45
<b>Figura 47:</b> Factor de seguridad.....	46
<b>Figura 48:</b> Análisis de convergencia .....	47
<b>Figura 49:</b> Detalles de malla (mesh) .....	49
<b>Figura 50:</b> Deformación total estructura rediseñada .....	49
<b>Figura 51:</b> Esfuerzo Von Mises estructura rediseñada.....	50
<b>Figura 52:</b> Factor de seguridad estructura rediseñada.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Especificaciones técnicas Hyundai HX220S .....	7
<b>Tabla 2:</b> Resistencia mínima al impacto con entalla Charpy en V.....	21
<b>Tabla 3:</b> Análisis de convergencia.....	46

## RESUMEN

La industria de la maquinaria pesada ha experimentado avances significativos consolidándose como un pilar fundamental en los sectores productivos de los países. Actividades de gran relevancia, como la minería, la agricultura y la construcción, han impulsado el desarrollo económico y social, evidenciando la importancia de esta maquinaria en el progreso de las sociedades.

La seguridad y protección de los operadores de maquinaria pesada es un tema en constante evolución, con innovaciones dirigidas al desarrollo de estructuras de protección adicionales. Estas estructuras, diseñadas para salvaguardar la vida de los trabajadores, son sometidas a rigurosas pruebas para garantizar su eficacia frente a riesgos operativos.

En Ecuador, sin embargo, persiste la ausencia de normativas específicas y responsabilidades claras que regulen la seguridad de estos equipos. Esto contrasta con el incremento en la importación de maquinaria pesada en los últimos años, la maquinaria corresponde a equipos como excavadoras, cargadoras y compactadores, principalmente provenientes de China que, en su mayoría, estos equipos carecen de estructuras adicionales de protección para la cabina, lo que pone en riesgo la seguridad de los operadores en entornos de trabajo de alta peligrosidad.

En el presente trabajo, se diseñó una estructura de protección contra la caída de objetos (FOPS) siguiendo medidas y materiales equivalentes a los utilizados en la realidad industrial. El diseño consideró estándares internacionales y fue sometido a simulaciones computacionales detalladas para evaluar parámetros clave como deformaciones, esfuerzos y factor de seguridad.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se identificó un sobredimensionamiento en ciertos componentes de la estructura inicial. Esto llevó a un rediseño optimizado que mantiene los estándares de seguridad requeridos, mientras se reducen los materiales de construcción de la estructura. Este proceso asegura una solución más eficiente sin comprometer la protección de los operadores.

**Palabras Claves:** Excavadora, FOPS, simulación, CAD, CAE

## ABSTRACT

The heavy machinery industry has undergone significant advancements, establishing itself as a fundamental pillar in the productive sectors of nations. Key activities such as mining, agriculture, and construction have driven economic and social development, highlighting the importance of this machinery in societal progress.

The safety and protection of heavy machinery operators is an ever-evolving subject, with innovations aimed at developing additional protective structures. These structures, designed to safeguard workers' lives, undergo rigorous testing to ensure their effectiveness against operational risks.

In Ecuador, however, there is a persistent lack of specific regulations and clear responsibilities governing the safety of such equipment. This contrasts with the increasing importation of heavy machinery in recent years. These machines, which include excavators, loaders, and compactors, are primarily imported from China, and most of them lack additional protective structures for the cabin. This absence poses significant risks to operators' safety in high-hazard work environments.

In this study, a Falling Object Protective Structure (FOPS) was designed following measurements and materials equivalent to those used in industrial applications. The design adhered to international standards and was subjected to detailed computational simulations to evaluate key parameters such as deformations, stresses, and the safety factor.

Based on the results obtained from the simulations, an over-dimensioning issue was identified in certain components of the initial structure. This led to an optimized redesign that maintained the required safety standards while reducing the construction materials of the structure. This process ensures a more efficient solution without compromising operator protection.

**Keywords:** Excavator, FOPS, Simulation, CAD, CAE

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la maquinaria pesada, la seguridad del operador es una prioridad fundamental, especialmente en entornos donde existe un alto riesgo de caída de objetos y vuelco de equipos. Aunque muchos fabricantes han avanzado en el diseño de cabinas, incorporando mejoras estructurales que permiten la instalación de sistemas de protección adicionales, estas iniciativas aún no son suficientes para garantizar plenamente la seguridad de los operadores.

Este proyecto propone el diseño optimizado de una estructura FOPS (Sistema de Protección Contra la Caída de Objetos) para excavadoras, basado en simulaciones de carga que evalúan diferentes condiciones de seguridad. El objetivo principal es desarrollar una solución efectiva que reduzca los riesgos y mejore la protección en entornos laborales de alta exigencia.

En el primer capítulo se abordan los marcos normativos y los antecedentes técnicos relacionados con la seguridad en maquinaria para el movimiento de tierras. Se analizan las normativas internacionales y los ensayos destructivos aplicados a estructuras FOPS, detallando los requisitos necesarios para garantizar la integridad del operador y la excavadora frente a la caída de objetos.

El capítulo 2 presenta el diseño de la estructura FOPS mediante software de diseño asistido por computadora (CAD), con especificaciones técnicas y basándose en dimensiones del objeto real de una excavadora Hyundai HX220S.

Las simulaciones de carga mediante el método de elementos finitos (MEF) y los resultados se presentan en el capítulo 3. Se realiza las pruebas de impacto, con diferentes materiales, para después seguir con el análisis detallado sobre las deformaciones, esfuerzos, puntos críticos y factor de seguridad.

En el capítulo 4, se realiza un rediseño de la estructura FOPS basado en los resultados obtenidos en el capítulo 3. Este rediseño se enfoca en ajustar los componentes estructurales, con el objetivo de optimizar el uso de materiales y mejorar la eficiencia sin comprometer los criterios de resistencia, durabilidad y seguridad. A partir del análisis detallado de los datos

de simulación, se seleccionan los ajustes necesarios para lograr un diseño final más eficiente y funcional.

## **PROBLEMA**

Las operaciones realizadas con maquinaria pesada implican diversos riesgos tanto para el personal como para las propias máquinas. En particular, las excavadoras, que se utilizan en una variedad de entornos como zonas urbanas, rurales, montañosas y minas, están expuestas a peligros significativos, siendo uno de los más comunes la caída de objetos desprendidos durante las actividades de manipulación o por desplomes accidentales. Según (Rivera Chica, 2017), este tipo de riesgo es constante y presenta un nivel de afección muy alto. Esto pone de manifiesto la necesidad urgente de equipar las excavadoras con estructuras robustas y confiables que puedan garantizar su capacidad operativa mientras protegen la integridad de los operadores y la maquinaria frente a condiciones adversas.

La demanda de maquinaria pesada en el país va en aumento, impulsada en gran parte por el crecimiento constante de los proyectos mineros. Este sector representa un beneficio económico clave para Ecuador. Según datos del (Banco Central del Ecuador, 2022), la inversión en minería durante el primer trimestre del año 2022 alcanzó los USD 35,5 millones. Además, entre enero y mayo de ese mismo año, las exportaciones de oro y plata ascendieron a 6,50 toneladas, lo que representa un incremento del 19,21% en comparación con el mismo período del año 2021. Estos datos reflejan el dinamismo del sector y su impacto positivo en la economía nacional.

En Ecuador no existen normativas específicas que regulen la seguridad de la maquinaria pesada, lo que significa que las máquinas importadas no están sujetas a requisitos mínimos en cuanto a medidas de seguridad refiere. Según datos de (Autoridad Portuaria de Manta, 2021), en noviembre del año 2021 ingresaron al país 635 excavadoras, mientras que en agosto del año 2023 se registraron 151 unidades. De estas, en su gran mayoría provienen de China, seguidas por Japón y Corea, y en menor medida de Estados Unidos y Reino Unido. Esto refleja que pocas excavadoras llegan equipadas con sistemas avanzados de seguridad, como las estructuras FOPS (Protección Contra la Caída de Objetos). La ausencia de estas medidas expone a los operadores a riesgos mortales, especialmente en entornos donde existe un peligro constante de caída de objetos pesados, como rocas y troncos, lo que subraya la necesidad urgente de establecer regulaciones que prioricen la seguridad laboral.

Según (Fatosla C.A., 2021) en cuanto a la excavadora Hyundai HX220S posee una cabina Serie 9S que está equipada con un tubo más resistente y delgado, diseñado para mejorar la seguridad y visibilidad del operador. Además, la estructura está fabricada con acero de bajo esfuerzo y alta resistencia, soldado integralmente para formar un bastidor superior e inferior más robusto y duradero. Sin embargo, aunque este sistema ofrece una mayor protección estructural, no es suficiente para garantizar por completo la seguridad del operador.

### **Delimitación del problema.**

Según la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2024), en julio del año 2024 se registró un incremento significativo en las importaciones de maquinaria pesada. Este aumento refleja una mayor demanda en sectores productivos clave y subraya la necesidad de implementar mejoras en las estructuras de protección, garantizando la seguridad de los operadores frente a los riesgos asociados con su operación.

Este proyecto está dirigido a empresas importadoras de maquinaria pesada, compañías mineras, constructoras civiles, Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) provinciales y otros actores del sector productivo donde el uso de maquinaria es esencial. Su propósito es implementar y promover nuevas medidas de seguridad, como la incorporación de estructuras FOPS (Protección Contra la Caída de Objetos), diseñadas para resistir impactos significativos y prevenir riesgos mortales para los operadores, así como minimizar daños materiales a las máquinas. Estas iniciativas buscan garantizar un entorno laboral más seguro y eficiente en actividades críticas para el desarrollo del país.

### **Objetivo General.**

Diseño y simulación de un sistema FOPS para la excavadora HX220S mediante elementos finitos orientado a la protección del operador y al cumplimiento de estándares vigentes.

### **Objetivos Específicos.**

- Investigar la normativa vigente para diseño de sistemas FOPS vigentes para maquinaria pesada.

- Diseñar un modelo del sistema FOPS, utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD) con los materiales y especificaciones de las normativas vigentes.
- Simular cargas al sistema FOPS mediante el método de elementos finitos (MEF) para evaluar su rendimiento, identificando puntos críticos y posibles fallas en el diseño.
- Proponer mejoras en el diseño del sistema FOPS basadas en los resultados obtenidos de la simulación.

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Excavadora: definición y riesgos en la operación

La norma (ISO, 2009) define por excavadora a máquina autopropulsada sobre orugas, ruedas o patas, con una estructura superior capaz de girar 360°, que está diseñada principalmente para excavar con una cuchara, sin movimiento del tren de rodaje durante el ciclo de trabajo.

Un ciclo de trabajo de una excavadora consiste en 4 tiempos: excavar, acarrear, descargar y retornar. Una excavadora también puede utilizarse para manipular o transportar objetos o materiales.

Según (SEOPAN, 2010) los riesgos asociados al uso de excavadora son:

- Caídas de personas al mismo o distinto nivel
- Caída de objetos desprendidos, por manipulación o desplome
- Pisadas del personal sobre objetos, Atropello de objetos
- Caídas de material sobre trabajadores
- Golpes y contactos contra elementos móviles, inmóviles, objetos y herramientas
- Proyección de fragmentos o partículas
- Atrapamientos por objetos o material
- Atrapamiento por vuelcos de maquinaria
- Contactos térmicos
- Contactos eléctricos
- Explosiones e incendios

- Atropellos, golpes y choques
- Ruido y vibraciones

### 1.1.1 Excavadora Hyundai HX220S

**Figura 1:** Excavadora Hyundai HX220S



Fuente: (HD HYUNDAI CONSTRUCTION EQUIPMENT, n.d.)

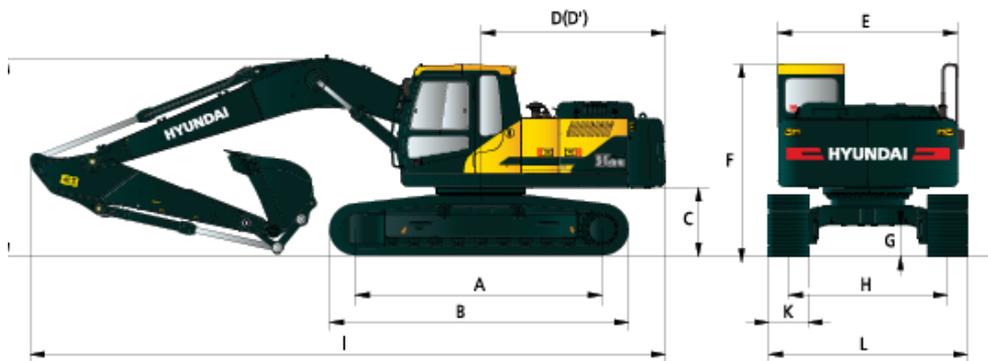
La excavadora Hyundai HX220S, según sus características detalladas en la Tabla 1, pertenece al segmento de excavadoras medianas, que es el más demandado en Ecuador debido a su excelente capacidad de adaptarse a diversas aplicaciones en la construcción y minería. Esta máquina destaca por su equilibrio entre potencia, rendimiento y eficiencia, lo que la convierte en una opción ideal para proyectos de infraestructura de mediana escala, así como para trabajos en terrenos difíciles.

**Tabla 1:** Especificaciones técnicas Hyundai HX220S

<b>Motor</b>	
Modelo	Hyundai 6BTAA-5.9 (HM5.9)
Tipo	Refrigerado por agua, diésel de 4 ciclos, 6 cilindros en línea, inyección directa,

	turboalimentado refrigerado por aire de bajas emisiones.
Potencia	148 HP (110 kW) a 2.000 rpm
Torque	64 kgf·m a 1.300 rpm
<b>Especificaciones</b>	
Peso Operativo	21.6 t
Fuerza de excavación del cucharón	13.600 kgf
Fuerza de excavación del brazo	12.200 kgf
Zapata	Garra Triple Rock - 600 mm
Capacidad del cucharón	1.2 m <sup>3</sup>

**Figura 2:** Dimensiones Hyundai HX220S



<b>Dimensiones</b>	
B. Longitud total de la oruga	4400 mm
E. Ancho total de la estructura superior	2700 mm
F. Altura total de la cabina	3000 mm
I. Longitud total	7570 mm
J. Altura total de la pluma	3100 mm
L. Ancho total	2900 mm

Fuente: (HD HYUNDAI CONSTRUCTION EQUIPMENT, n.d.)

## **1.2 ISO 3449**

La norma ISO 3449 indica los requerimientos mínimos que debe cumplir una estructura de protección FOPS, mediante pruebas de laboratorio estandarizadas.

Según la norma (UNE-EN ISO, 2008) el procedimiento de prueba generalmente es destructivo para el conjunto FOPS, ya que producirá una deformación permanente en la estructura.

## **1.3 Estructuras de protección**

### **1.3.1 Estructura de protección FOPS**

FOPS (Falling Object Protective Structures), lo que traducido se interpreta como estructura protectora en caso de una eventual caída de objetos.

Este sistema se define como: sistema de elementos estructurales dispuestos de tal manera que proporcione a los operadores una protección razonable contra la caída de objetos (árboles, rocas, pequeños bloques de hormigón, herramientas manuales, etc.).

### **1.4 Volumen de límite de deflexión (DLV)**

La norma (ISO, 2013), define que el volumen del límite de deflexión se entiende a la aproximación ortogonal de un operador masculino grande, sentado, con ropa normal y casco de seguridad.

**Figura 3:** Perspectiva de DLV para pruebas de impacto



Fuente: (Kaneda & Tamagawa, 2003)

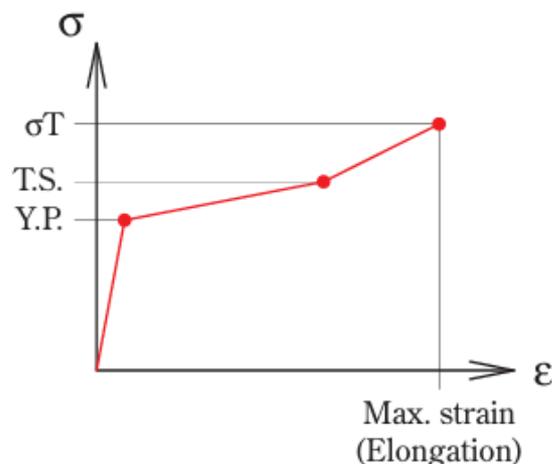
### 1.5 Esfuerzos y deformaciones

Como lo menciona (Hernandez et al., 2021), los esfuerzos hacen referencia a las fuerzas internas que actúan dentro de un material bajo carga, mientras que las deformaciones representan los cambios físicos en la forma o tamaño del material como resultado de estas fuerzas. En el caso de las estructuras FOPS, es esencial analizar cómo responden a impactos provenientes de objetos pesados, como rocas o escombros, simulando condiciones reales de operación.

Como lo especifica (Kaneda & Tamagawa, 2003), una curva de tensión – deformación (Figura 4) expresa la relación de tensión – deformación hasta la aparición de una rotura. El modelo FOPS está sujeto a una deformación elástica hasta el punto de fluencia (Y.P.), desde donde hasta la resistencia a la tracción de fluencia (T.S.) está sujeto a una deformación plástica. La deformación del modelo continúa hasta que se rompe bajo la tensión de rotura real  $\sigma_T$ .

La validez de estas propiedades mecánicas se debe juzgar comparándolas con los valores medidos obtenidos mediante la prueba FOPS.

**Figura 4:** Curva de esfuerzo y deformación para el modelo de cálculo



Fuente: (Kaneda & Tamagawa, 2003)

## 1.6 Elementos finitos

La simulación dentro de la ingeniería es cada día más importante para resolver problemas complejos, mejorar diseños y optimizar recursos. “El método de elementos finitos es un método de numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales” (Pereiro, 2006).

Según (Celigüeta-Lizarza, 2011), el método de elementos finitos se utiliza mayormente en sistemas continuos, ya que son frecuentes en ingeniería como: chasis de vehículos, bastidores, elementos de máquinas.

Refiriéndonos estrictamente a las estructuras de protección ROPS/FOPS, el método de elementos finitos ha creado la base para obtener resultados con alta precisión, permitiendo la adopción en el proceso de diseño de soluciones técnicas cercanas a las óptimas.

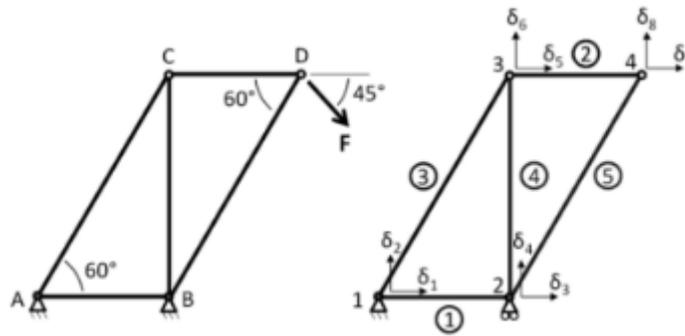
### 1.6.1 Discretización

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

- El elemento se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas entre sí, de formas geométricas sencillas llamadas elementos finitos.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nudos o nodos.

Cada nodo tiene un determinado grado de libertad, pueden ser movimientos horizontales (x) y verticales (y), eso dependerá del elemento a resolver.

**Figura 5:** Ejemplo de discretización de un medio continuo en elementos finitos de propiedades conocidas.



Fuente: (ABASOLO BILBAO et al., 2017)

### 1.6.2 Mallado

El mallado (Mesh) consiste en dividir la geometría del modelo en pequeñas entidades llamadas elementos finitos, conectados por nodos, que permiten analizar cómo se distribuyen las fuerzas, tensiones y deformaciones en la estructura.

La calidad y el tamaño de la malla desempeñan un papel fundamental en la precisión de los resultados. Como lo menciona (ABASOLO BILBAO et al., 2017), una malla más refinada, con elementos más pequeños, proporciona simulaciones más cercanas a la realidad, ya que captura mejor los detalles geométricos y los gradientes de las variables físicas. Sin embargo, esto también aumenta el tiempo de cálculo y los requerimientos computacionales. Por otro lado, una malla más gruesa reduce los recursos necesarios, pero podría comprometer la exactitud de los resultados. Lo que traduce en que el mallado a utilizar dependerá del analista.

### 1.6.3 ANSYS

(Stolarski et al., 2018) lo define como un software de ingeniería que permite simular y analizar el comportamiento de sistemas complejos bajo varias condiciones físicas. Mediante el método de elementos finitos (FEM), simula el funcionamiento de los sistemas en el mundo real, disminuyendo la necesidad de pruebas físicas, economizando tiempo y recursos en el desarrollo.

## **CAPITULO 1**

### **ANALISIS DE NORMATIVA**

La protección contra la caída de objetos, conocida como FOPS, es esencial para garantizar la seguridad del operador en el ámbito de la maquinaria pesada. Estas estructuras están diseñadas para resistir impactos de objetos que puedan caer sobre la cabina durante las operaciones, reduciendo significativamente el riesgo de lesiones graves o fatales. La evaluación de las estructuras FOPS están regulados por la norma internacional ISO 3449, que establece los requisitos técnicos y los ensayos necesarios para asegurar su eficacia y resistencia en condiciones operativas exigentes.

#### **1.1 Niveles de pruebas de impacto**

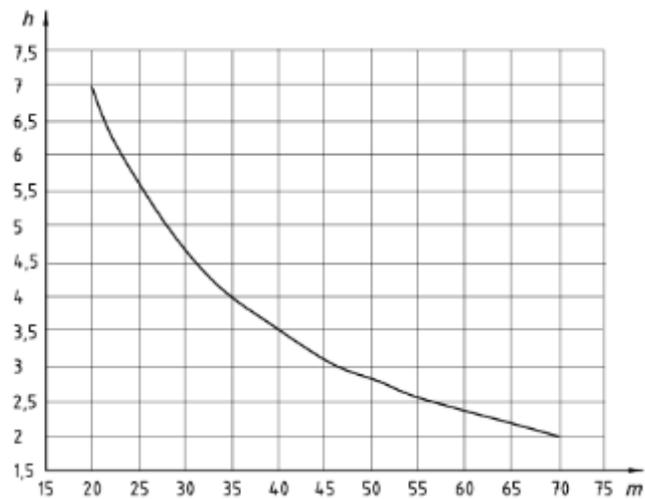
La norma ISO 3449 establece dos niveles de protección, nivel I que está diseñado para resistir impactos leves y nivel II el cual ya tiene como objetivo soportar elementos grandes como rocas.

##### **1.1.1 Protección contra impacto nivel I**

Este tipo de protección se considera el nivel más básico de seguridad para una FOPS. Según la norma ISO 3449, este nivel debe garantizar resistencia al impacto para proteger contra la caída de objetos pesados, como árboles y ramas, en máquinas utilizadas en tareas de limpieza forestal o en actividades de silvicultura.

La prueba de impacto de Nivel I se caracteriza por utilizar un objeto de prueba redondo que se deja caer desde una altura determinada para desarrollar una energía suficiente de 1365 J

**Figura 6:** Curva de requerimiento energético de nivel I



Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

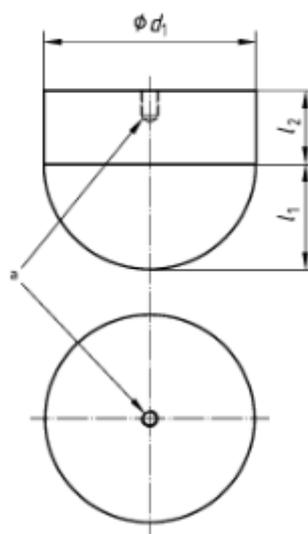
$h$  height (altura), m

$m$  mass (masa), kg

$$5 \text{ kg} \times 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 3,1 \text{ m} \approx 1365 \text{ J} \quad (1)$$

El objeto de prueba es una esfera sólida de acero o hierro dúctil con una masa típica de 45 kg y un diámetro de superficie de contacto esférica de entre 200 mm y 250 mm.

**Figura 7:** Objeto de prueba Nivel I



Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

Donde:

$$l1 \approx 102 \text{ mm}$$

$$l2 \approx 109 \text{ mm}$$

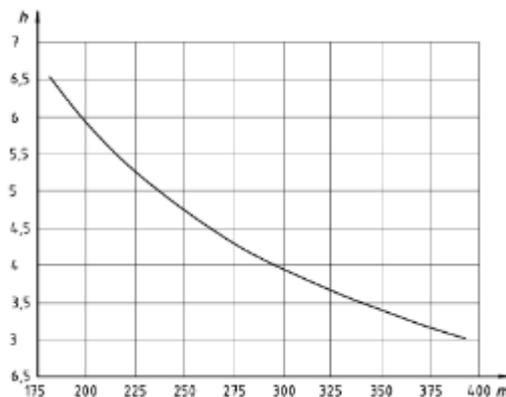
$$l3 \approx 584 \text{ mm}$$

### 1.1.2 Protección contra impacto nivel II

El nivel II de protección ofrece una cobertura más robusta y está diseñado específicamente para resistir la caída de objetos pesados, como rocas, escombros y materiales de gran tamaño. Este nivel de protección es esencial para máquinas que operan en entornos de alto riesgo, como minería, construcción en altura y demoliciones.

La prueba de impacto de Nivel II se diferencia por utilizar un objeto de ensayo cilíndrico que se deja caer a una altura suficiente para desarrollar una energía de 11 600 J.

**Figura 8:** Curva de requerimiento energético de nivel II



Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

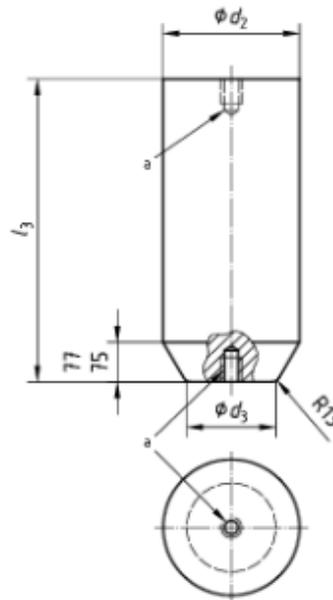
$h$  height (altura), m

$m$  mass (masa), kg

$$227 \text{ kg} \times 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 5,22 \text{ m} \approx 11\,600 \text{ J} \quad (2)$$

El objeto para pruebas de nivel II, es un cilindro de acero sólido o de hierro dúctil y una masa típica de 227 kg.

**Figura 9:** Objeto de prueba Nivel II



Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

Donde:

$$d_1 = 204 \text{ mm}$$

$$d_2 = 255 \text{ a } 260 \text{ mm}$$

$$d_3 = 203 \text{ a } 204 \text{ mm}$$

## 1.2 Procedimiento de prueba para FOPS nivel II

La prueba de impacto consta de tres momentos:

- a) Elevar el objeto de prueba a la altura requerida
- b) Soltarlo de modo que caiga sin restricciones

- c) Determinar si la FOPS ingresa al volumen límite de deflexión (DLV) durante la prueba.

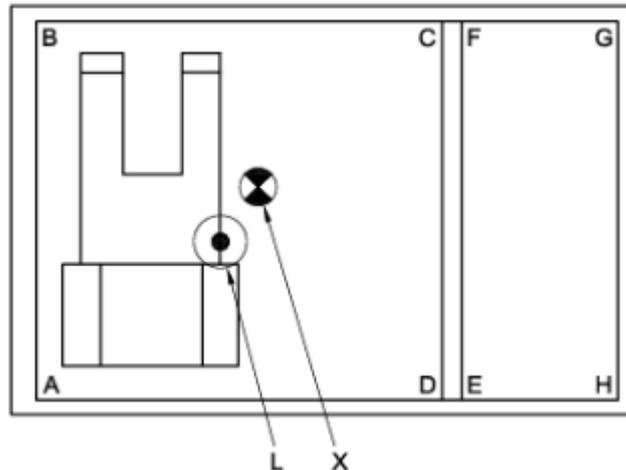
El objeto de prueba debe estar sobre la FOPS, con el extremo pequeño hacia abajo en el lugar del impacto.

La norma (UNE-EN ISO, 2008) establece diversos casos de prueba, ya que no todas las máquinas tienen el mismo diseño. Cada prueba especifica el centroide y el punto de impacto, los cuales deben determinarse según las proyecciones del DLV.

### 1.2.1 Caso de prueba 1

Cuando los elementos horizontales principales superiores de la FOPS no entren en la proyección vertical del DLV en la parte superior de la FOPS, se selecciona la ubicación del impacto del objeto de prueba de modo que produzca la mayor deformación hacia el plano horizontal superior del DLV y esté lo más cerca posible del centroide de la estructura de la FOPS.

**Figura 10:** Puntos de interés del caso 1



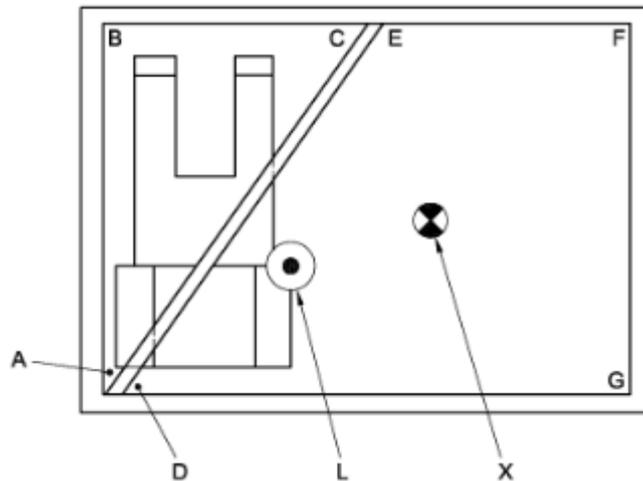
Los centroides del FOPS se ubican dentro del área estructural entre A, B, C, D.

Fuente:(UNE-EN ISO, 2008)

### 1.2.2 Caso de prueba 2

Cuando los elementos horizontales superiores principales de la FOPS entren en la proyección vertical del DLV en el elemento estructural superior de la FOPS, y el material de recubrimiento de todas las áreas de superficie por encima del DLV sea el mismo y de espesor uniforme.

**Figura 11:** Puntos de interés del caso 2



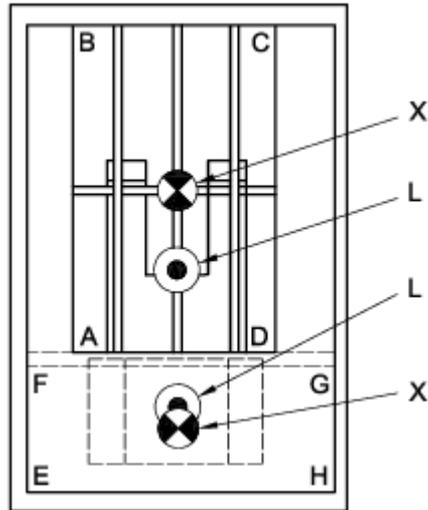
Los centroides se ubicarán dentro del área D, E, F, G ya que es mayor al área A, B, C, aunque la sección DLV proyectada sea mayor en esta última. Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

### 1.2.3 Caso de prueba 3

Cuando se utilicen materiales diferentes o un espesor diferente en distintas áreas por encima de la DLV, someta cada área a una prueba de impacto. Seleccione la ubicación del impacto del objeto de prueba para cada área de modo de producir la mayor deformación sobre, parcialmente sobre o tangente al plano horizontal más alto de la DLV, con la menor distancia posible desde el centroide, pero fuera del área de cualquier miembro estructural superior de la FOPS.

Este caso de prueba tiene la particularidad de que se realiza con 2 impactos, los lugares donde se deben realizar la prueba se especifican en la Figura 9.

**Figura 12:** Puntos de interés del caso 3



La ubicación del impacto 1 está en el área A, B, C, D. La ubicación del impacto 2 está en el área FOPS E, F, G, H. Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

Donde:

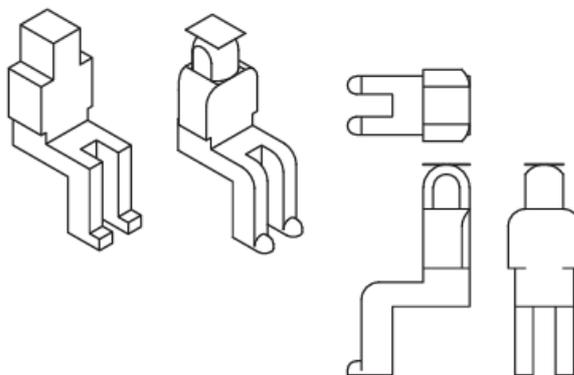
X Centroide del área de la superficie de la FOPS

L Ubicación del impacto

### 1.3 Volumen de límite de deflexión (DLV) para prueba FOPS

Para realizar la prueba de estructura FOPS la norma (ISO, 2013) determina que, el DLV debe cumplir requerimientos distintos a los demás tipos de estructuras de protección. “El elemento deberá utilizar el DLV redondeado con un plano ortogonal agregado”.

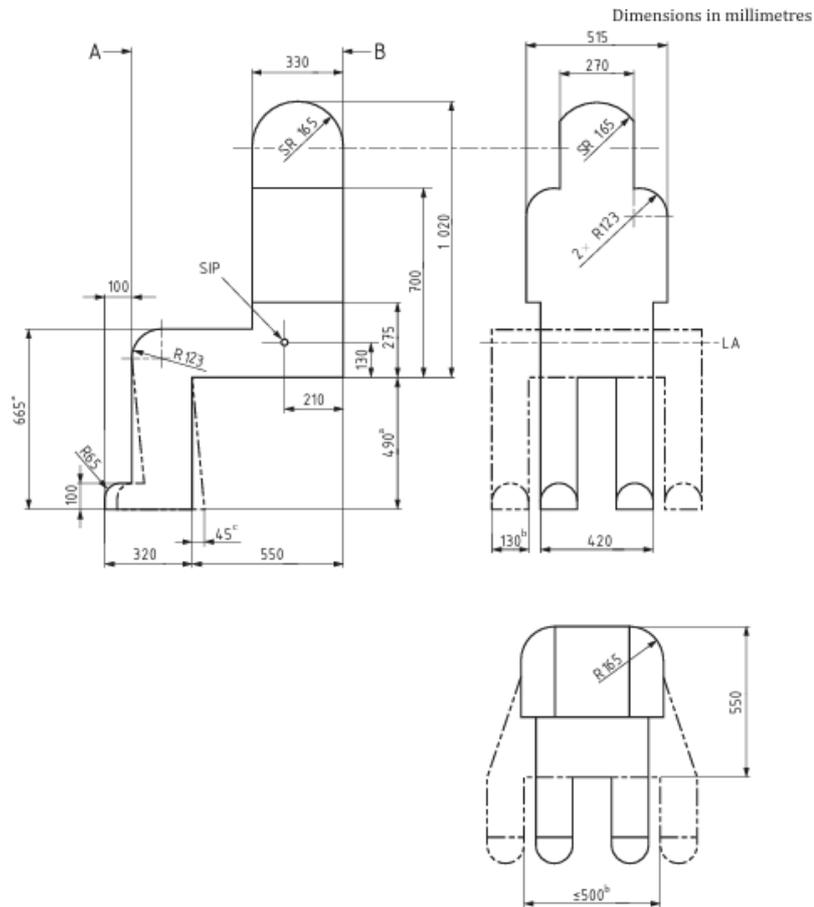
**Figura 13:** Perspectiva del DLV redondeado y plano agregado para pruebas FOPS



Fuente: (ISO, 2013)

El DLV ortogonal con esquinas redondeadas es utilizado en las pruebas FOPS, esto con el objetivo de aproximarse a la curvatura del operador (cabeza, hombros), las dimensiones se muestran en la Figura 11.

**Figura 14:** Dimensiones DLV ortogonal redondeado



Fuente: (ISO, 2013)

Donde:

A Plano limite frontal

B Plano limite posterior

LA Eje de localización

SIP Punto de índice del sientto

#### 1.4 Material

La norma ISO 3449 no establece un material específico para conformar la FOPS, pero sí de requerimientos para garantizar una resistencia significativa. Esto no está relacionado con las condiciones de funcionamiento.

“Los elementos estructurales de la FOPS deben estar hechos de aceros que cumplan o superen una de las resistencias al impacto de entalla en V Charpy (CVN) a  $-20\text{ °C}$  o  $-30\text{ °C}$ ” (UNE-EN ISO, 2008).

**Tabla 2:** Resistencia mínima al impacto con entalla Charpy en V

Specimen size mm	Energy at	
	$-30\text{ °C}$ J	$-20\text{ °C}^b$ J
$10 \times 10^a$	11	27,5
$10 \times 9$	10	25
$10 \times 8$	9,5	24
$10 \times 7,5^a$	9,5	24
$10 \times 7$	9	22,5
$10 \times 6,7$	8,5	21
$10 \times 6$	8	20
$10 \times 5^a$	7,5	19
$10 \times 4$	7	17,5
$10 \times 3,3$	6	15
$10 \times 3$	6	15
$10 \times 2,5^a$	5,5	14

<sup>a</sup> Indicates preferred size. Specimen size shall be no less than the largest preferred size that the material will permit.

<sup>b</sup> The energy requirements at  $-20\text{ °C}$  is 2,5 times the value specified for  $-30\text{ °C}$ . Other factors affect impact energy strength, i. e. direction of rolling, yield strength, grain orientation and welding. These factors shall be considered when selecting and using a steel.

Fuente: (UNE-EN ISO, 2008)

“Se considerará que el acero de menos de 2,5 mm de espesor con un contenido máximo de carbono del 0,2 % cumple con el requisito de Charpy”

### 1.5 Requisitos de desempeño

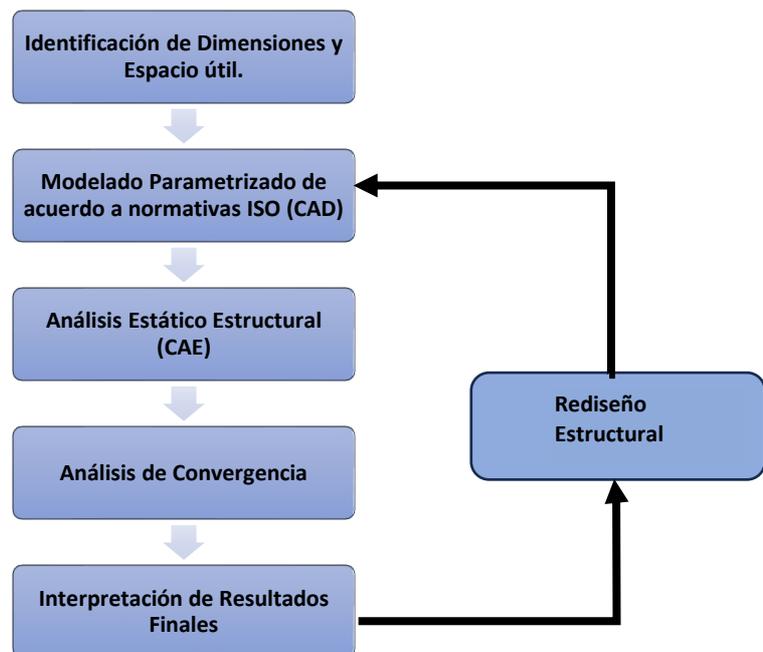
La norma (UNE-EN ISO, 2008) aclara que ninguna parte de la estructura protectora deberá penetrar en el DLV durante el primer impacto o los impactos siguientes del objeto de

prueba. Si el objeto de prueba penetra la FOPS, se considerará que la FOPS no ha superado la prueba.

## CAPITULO 2 DISEÑO ESTRUCTURAL FOPS

En el presente capítulo se define el diseño estructural del sistema de seguridad FOPS, para lo cual se realizó un flujograma (figura 15) que facilita la comprensión del enfoque adoptado y clarificando las etapas clave que permiten asegurar que las actividades estén alineadas con los objetivos planteados.

**Figura 15:** Flujograma de la metodología de trabajo



En este capítulo se detalla el proceso de diseño de la estructura FOPS utilizando el software Autodesk Inventor. Este modelo tridimensional es esencial para realizar diseños estructurales.

### 2.1 Autodesk Inventor

Se define (Inventor & Tooling, 2002) como un software de diseño asistido por computadora (CAD) ampliamente utilizado en la ingeniería y la industria para la creación de modelos tridimensionales precisos.

Como lo menciona (Dumitrache, 2011) se pueden desarrollar piezas individuales, ensamblajes complejos y planos técnicos, integrando herramientas avanzadas para realizar diseño y ensamblajes estructurales. En el contexto del diseño de estructuras de protección como el sistema FOPS, Autodesk Inventor proporciona un entorno versátil que permite visualizar y analizar el comportamiento estructural antes de la fabricación, reduciendo costos y riesgos asociados a posibles fallos.

### 2.1.1 Ventajas

- Modelado paramétrico:** Una de las principales ventajas de Autodesk Inventor es su capacidad para diseñar de manera paramétrica. Esto significa que los componentes pueden modificarse fácilmente al cambiar parámetros específicos, como dimensiones o materiales, lo que ahorra tiempo durante el proceso de iteración del diseño.

En las siguientes figuras se presentan todos los parámetros que contempla el diseño de la estructura de seguridad FOPS.

**Figura 16:** Parámetros de diseño

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tol.	Valor cota del m	Clave	Ex	Comentario
<b>Parámetros del modelo</b>									
largotapa	Boceto1	mm	1670 mm	1670.000000	●	1670.000000	☐	☐	Largo total de la tolva superior de la estructura
anchotapa	Boceto1	mm	1000 mm	1000.000000	●	1000.000000	☐	☐	Ancho total de la tolva superior de la estructura
Espesortapa	Extrusión1	mm	50 mm	50.000000	●	50.000000	☐	☐	Espesor total de la tolva superior de la estructura
d3	Extrusión1	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	☐	☐	
largorejilla	Boceto2	mm	500 mm	500.000000	●	500.000000	☐	☐	Largo orificio en la tolva para rejilla
d8	Extrusión2	mm	150 mm	150.000000	●	150.000000	☐	☐	Medida para lograr orificios en la estructura
d9	Extrusión2	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	☐	☐	
diametro	d21, d18, Boceto2	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	☐	☐	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d13	Boceto2	mm	Emplame	50.000000	●	50.000000	☐	☐	Redondeado de esquinas de rejilla en la estructura
Emplame	d40, d39, d13, Boceto2	mm	50 mm	50.000000	●	50.000000	☐	☐	Redondeado de esquinas de rejilla en la estructura
d18	Boceto2	mm	diametro	35.000000	●	35.000000	☐	☐	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
distancialateraldia...	Boceto2	mm	60 mm	60.000000	●	60.000000	☐	☐	Distancia de los orificios de sujecion con parte lateral de la tolva

**Figura 17: Parámetros de diseño**

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tol.	Valor cota del m	Clave		Comentario
d21	Boceto2	mm	diametro	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
Espesor ancho	Boceto5	mm	2 mm	2.000000	●	2.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Espesor de plancha principal de la estructura
Espesor largo	Boceto5	mm	2 mm	2.000000	●	2.000000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Espesor de plancha principal de la estructura
espesor superior	Extrusión4	mm	48 mm	48.000000	●	48.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Extrusion para lograr la medida de espesor
d31	Extrusión4	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d33	Empalme2	mm	5 mm	5.000000	●	5.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Medida de doblez de la plancha principal
distancia inferior dia...	Boceto2	mm	150 mm	150.000000	●	150.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia de los orificios de sujecion con parte inferior de la tolva
distancia entre diam...	Boceto2	mm	500 mm	500.000000	●	500.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre hueco inferior y hueco del medio
distancia entre diam...	Boceto2	mm	700 mm	700.000000	●	700.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre el hueco superior y hueco del medio
ancho rejilla	Boceto2	mm	600.0000000 mm	600.000000	●	600.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ancho orificio en la tolva para rejilla
d39	Boceto2	mm	Emplame	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redondeado de esquinas de rejilla en la estructura
d40	Boceto2	mm	Emplame	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redondeado de esquinas de rejilla en la estructura

**Figura 18: Parámetros de diseño**

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tol.	Valor cota del m	Clave		Comentario
d65	Extrusión6	mm	70 mm	70.000000	●	70.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia/Largo de la pieza que sujeta la estructura al techo
d66	Extrusión6	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diametro bases	d103, d102, d101, d100, d99, Bo...	mm	80 mm	80.000000	●	80.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las bases que sujetan estructura y techo
d68	Extrusión7	mm	10 mm	10.000000	●	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Espesor de las bases que sujetan estructura y techo
d69	Extrusión7	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d70	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d71	Extrusión8	mm	100 mm	100.000000	●	100.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Medida para lograr orificios de anclaje
d72	Extrusión8	gr	0.00 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
ancho anclaje	d98, d97, d96, d95, d94, Boceto8	mm	50.0000000 mm	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d79	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d80	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo

**Figura 19: Parámetros de diseño**

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tol.	Valor cota del m	Clave	Ex	Comentario
d81	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d82	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d83	Boceto10	mm	35 mm	35.000000	●	35.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de los orificios de anclaje entre estructura y techo
d84	Plano de trabajo2	mm	50.249 mm / 2 su	25.124500	●	25.124500	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d85	Boceto11	mm	100 mm	100.000000	●	100.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado superior de la estructura y extremo del pasamanos
d86	Boceto11	mm	100 mm	100.000000	●	100.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado Inferior de la estructura y extremo del pasamanos
d87	Boceto11	mm	100 mm	100.000000	●	100.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado lateral de la estructura y extremo del pasamanos
d89	Boceto11	mm	50 mm	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redondeado de la estructura del pasamanos
d90	Boceto11	mm	100 mm	100.000000	●	100.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado Inferior de la estructura y extremo del pasamanos

**Figura 20: Parámetros de diseño**

Nombre de parámetro	Consumido por	Unidad/Tipo	Ecuación	Valor nominal	Tol.	Valor cota del m	Clave	Ex	Comentario
d91	Boceto11	mm	75 mm	75.000000	●	75.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado lateral de la estructura y extremo del pasamanos
d92	Boceto11	mm	75 mm	75.000000	●	75.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distancia entre lado lateral de la estructura y extremo del pasamanos
d93	Boceto11	mm	50.000 mm	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Redondeado de la estructura del pasamanos
d94	Boceto8	mm	anchoandaje	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d95	Boceto8	mm	anchoandaje	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d96	Boceto8	mm	anchoandaje	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d97	Boceto8	mm	anchoandaje	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d98	Boceto8	mm	anchoandaje	50.000000	●	50.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las piezas que van sujetas al techo
d99	Boceto9	mm	Diametrobases	80.000000	●	80.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las bases que sujetan estructura y techo
d100	Boceto9	mm	Diametrobases	80.000000	●	80.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diametro de las bases que sujetan estructura y techo

- **Ensamblajes complejos:** Inventor permite crear y gestionar ensamblajes que contienen múltiples piezas, asegurando que todas las partes encajen correctamente y que el diseño cumpla con las especificaciones técnicas requeridas.
- **Compatibilidad y exportación:** Inventor es compatible con una amplia variedad de formatos de archivo, lo que facilita la colaboración con otros programas o herramientas utilizadas en la industria.

## 2.2 Objetivos del diseño

Dentro del diseño estructural se garantiza la compatibilidad de la estructura FOPS con el modelo de excavadora seleccionada, asegurando que se pueda montar e integrar de manera adecuada sin comprometer la funcionalidad de la máquina ni la ergonomía del operador. Para ello, se consideraron dimensiones precisas, puntos de fijación adecuados y un diseño que respete las características operativas de la excavadora.

De igual manera, en la selección de materiales para el diseño de la estructura FOPS se basó en las especificaciones de la estructura real, garantizando así que las propiedades mecánicas y físicas del diseño correspondan a las condiciones reales de operación.

### **2.3 Datos Iniciales**

Para recopilar las medidas exactas de la estructura de seguridad, se utilizó un enfoque combinado de herramientas de medición precisas y observación directa en el sitio. Se emplearon instrumentos como cintas métricas y calibradores para registrar las dimensiones, incluyendo la altura, ancho y profundidad. Además, se realizaron mediciones repetitivas desde diferentes puntos de referencia en la cabina de la excavadora para garantizar la exactitud y minimizar posibles errores.

Figura 21: Cabina de Excavadora HX220S



6 puntos de anclaje para la estructura FOPS en el techo de cabina de excavadora.

**Figura 22:** Estructura FOPS instalada



#### **2.4 Diseño Conceptual**

La estructura FOPS fue diseñada de forma independiente, excluyendo cualquier componente adicional de la cabina. Este enfoque sigue las recomendaciones de (Kaneda & Tamagawa, 2003), quienes señalaron que, en los cálculos de FOPS, la presencia o ausencia de las partes situadas por debajo de la sección transversal tiene una relevancia mínima. Esto se debe a que las colisiones en este contexto son extremadamente rápidas y localizadas.

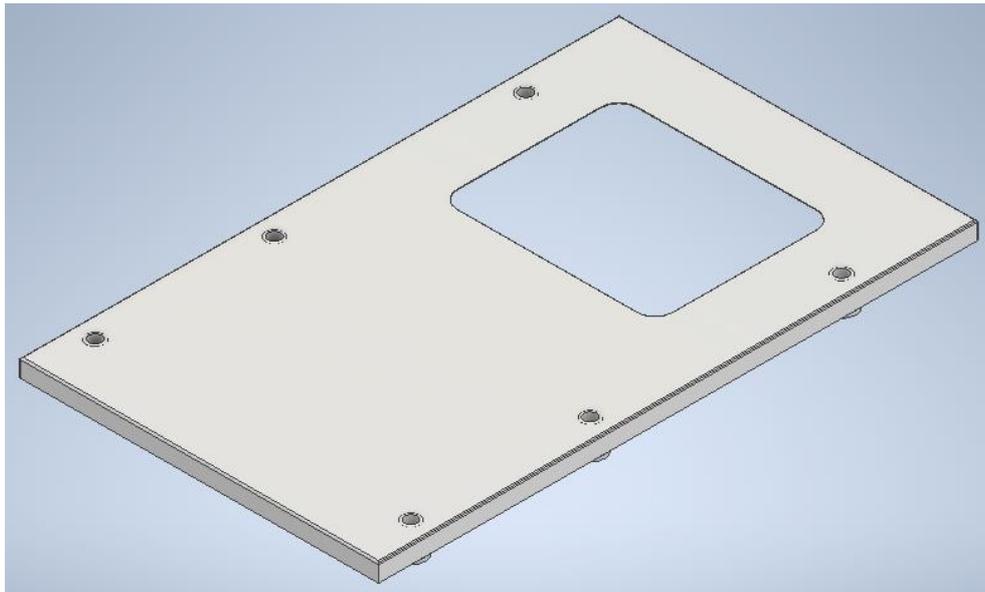
Asimismo, elementos como el vidrio de la ventana y otros componentes que no influyen directamente en la resistencia de la estructura FOPS fueron excluidos del diseño de la estructura.

Se llevó a cabo un diseño preliminar en 2D parametrizado con el objetivo de establecer medidas y proporciones generales de la estructura, proporcionando una base sólida para su desarrollo detallado. Este diseño inicial permitió visualizar de manera esquemática la configuración y dimensiones clave.

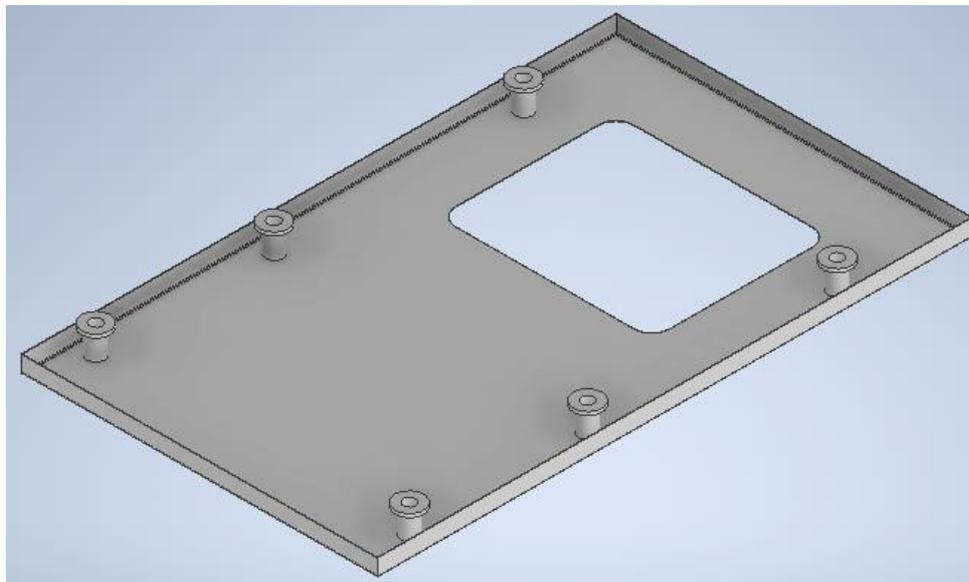
El diseño se dividió en etapas para facilitar su elaboración y ajuste. La primera etapa se centró en la parte superior de la estructura, definiendo su geometría y dimensiones



**Figura 24:** modelado 3D estructura superior

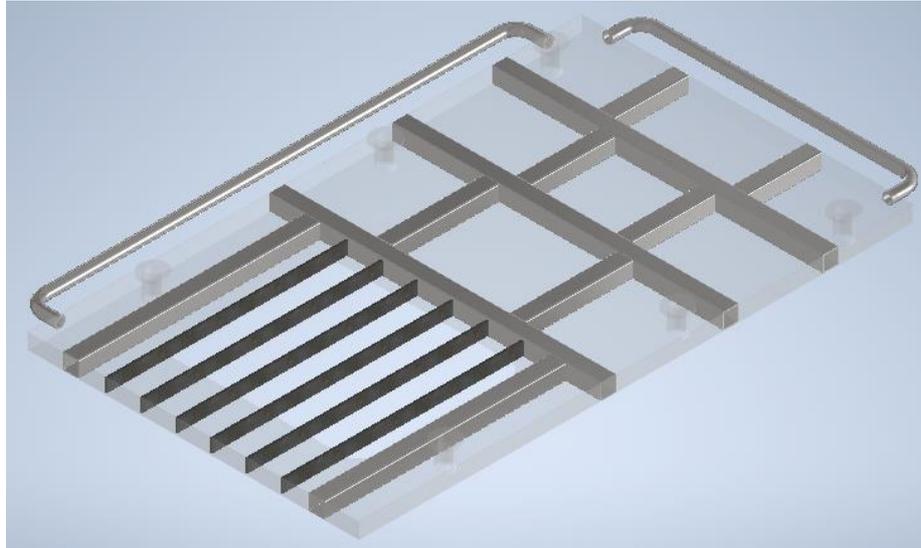


**Figura 25:** modelado 3D estructura superior



El diseño incluyó componentes como refuerzos interiores (Figura 22) ubicados en la parte interna de la estructura superior, cada uno optimizado para soportar cargas específicas.

**Figura 26:** Modelado 3D estructura interna



La documentación técnica es una herramienta clave en el proyecto, ya que proporciona información detallada necesaria para la validación del diseño, así como para los procesos de ensamblaje y fabricación. Entre los elementos que componen esta documentación se encuentran los planos de diseño, que son esenciales, ya que especifican la disposición, los materiales y las dimensiones exactas de la estructura FOPS

Los planos detallados de la estructura FOPS, que incluyen la disposición, dimensiones y materiales, se encuentran adjuntos en los anexos de este documento. Estos planos son fundamentales para complementar la información presentada en el desarrollo del proyecto y garantizar la correcta interpretación y ejecución del diseño.

### **CAPITULO 3 SIMULACIONES DE CARGA Y ESFUERZOS**

En este capítulo se presentan las simulaciones realizadas para evaluar la resistencia y seguridad de la estructura diseñada. Estas simulaciones se llevaron a cabo con el objetivo de identificar posibles fallas o debilidades en el diseño, garantizando así que la estructura cumpla con los estándares de calidad y seguridad requeridos por la norma ISO 3449.

La elección de ANSYS como herramienta de simulación se debe a su robustez, precisión y flexibilidad para modelar tanto condiciones lineales como no lineales, tal como lo

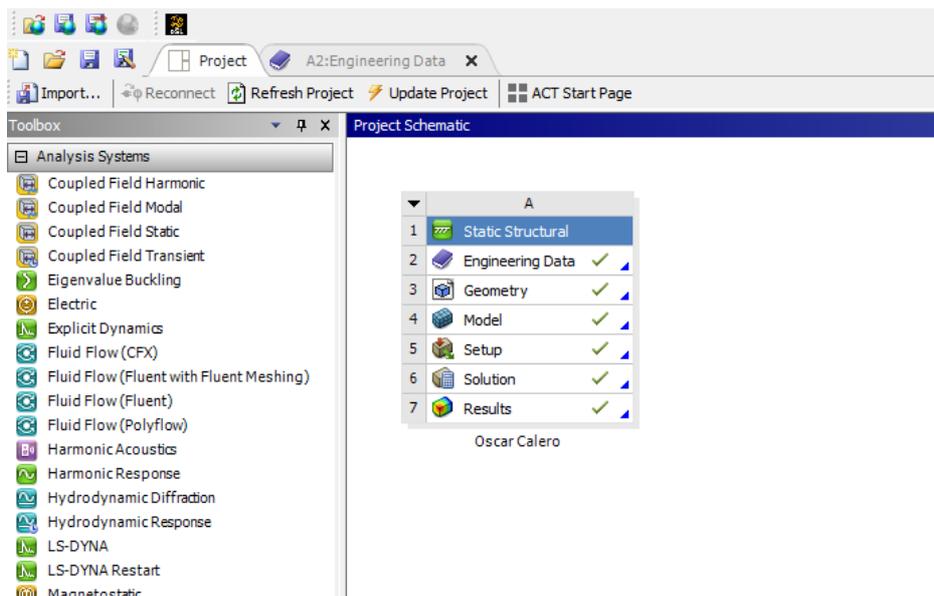
menciona (Kumar et al., 2014). Además, este software permite la integración de modelos de materiales avanzados y configuraciones de análisis que se ajustan a las necesidades de este proyecto.

### 3.1 Proceso de simulación

Para iniciar una simulación en ANSYS, es fundamental familiarizarse con las interfaces de usuario que ofrece. Esto incluye comprender la estructura de las pantallas de trabajo, como el espacio de diseño y las herramientas de simulación. Además, es importante conocer los conceptos básicos relacionados con la creación y edición de geometrías, la creación de librerías personalizadas, la asignación de materiales, la definición de condiciones de contorno, y la configuración de parámetros de simulación.

A continuación, se presenta una breve descripción sobre la interfaz de inicio y desarrollo de ANSYS.

**Figura 27.** Project Schematic de simulación - ANSYS



### 3.2 Estructura

Este apartado da referencia sobre el análisis o física que se va a realizar, en este caso un análisis mecánico estructural del sistema de seguridad FOPS.

### 3.3 Datos de ingeniería

Se establecen los materiales a utilizar en las simulaciones. Se creó una librería personalizada en el software de simulación, complementando esta selección con información específica sobre las propiedades de cada material. Esto permitió realizar simulaciones más realistas y ajustadas a las condiciones del diseño.

### 3.3.1 Acero ASTM A36

Para la simulación de este proyecto fue seleccionado el acero ASTM A 36, ya que, se trata del material utilizado en la construcción de la estructura real de sistemas de seguridad en maquinaria pesada, lo que asegura que las simulaciones reflejen con precisión el comportamiento estructural esperado. Además, como se menciona en (Valenzuela & Torres, 2016), este material es ampliamente reconocido por su alta resistencia a la tracción, buena ductilidad y capacidad para soportar cargas pesadas, lo que lo hace ideal para aplicaciones estructurales.

**Figura 28:** Acero ASTM A36



ASTM A36 Steel	
Density	7,85e-06 kg/mm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,1e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,26000
Bulk Modulus	1,4583e+05 MPa
Shear Modulus	83333 MPa
Tensile Ultimate Strength	450,00 MPa
Tensile Yield Strength	250,00 MPa

Además, en este apartado es necesario ingresar manualmente las propiedades del material en el software. Esto implica definir parámetros clave como densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, resistencia máxima a la tensión y resistencia a la fluencia por tracción. Este paso es fundamental para garantizar que la simulación utilice las características mecánicas y físicas correctas del material seleccionado.

**Figura 29:** Propiedades de los materiales.

Properties of Outline Row 5: ASTM A570 Steel, grade 36			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7,8	g cm <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
10	Tensile Yield Strength	250	MPa
11	Tensile Ultimate Strength	365	Pa

**Figura 30:** Propiedades de los materiales

Table of Properties Row 4: Isotropic Elasticity					
	A	B	C	D	E
1	Temperature (C)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Bulk Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)
2		210	0,28	1,5909E+11	8,2031E+10
*					

Para la correcta información de las propiedades, se utilizó como fuente de consulta la página MatWeb, la cual se define como: "una base de datos en línea que proporciona especificaciones técnicas y propiedades de materiales utilizados en ingeniería y diseño, ofreciendo acceso a información sobre metales, polímeros, cerámicas y compuestos, ampliamente utilizada para la selección y comparación de materiales."(MatWeb, n.d.).

**Figura 31:** Propiedades Acero ASTM A36

Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>
Mechanical Properties	Metric	English
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi
Elongation at Break	20 %	20 %
	23 %	23 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Compressive Yield Strength	152 MPa	22000 psi
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi
Poissons Ratio	0.26	0.26
Shear Modulus	79.3 GPa	11500 ksi

Fuente: (MatWeb, n.d.)

### 3.3.2 Acero ASTM A570 grado 36

El acero ASTM A570 Grado 36 fue seleccionado como nueva propuesta de material debido a sus propiedades mecánicas similares al ampliamente utilizado acero ASTM A36, reconocido por su versatilidad y resistencia en aplicaciones estructurales (KOKOT & OGIERMAN, 2019) .

Además, estudios como el de (GHEORGHE et al., 2018), destacan la idoneidad de este tipo de materiales para aplicaciones similares. En dicho estudio, se llevaron a cabo simulaciones con el S275JR, material con propiedades similares al presentado, analizando su comportamiento bajo diversas condiciones y espesores, lo que permitió evaluar su capacidad para absorber impactos y soportar cargas dinámicas. Estos resultados son relevantes, ya que validan el desempeño del material en estructuras de protección como las utilizadas en maquinaria pesada.

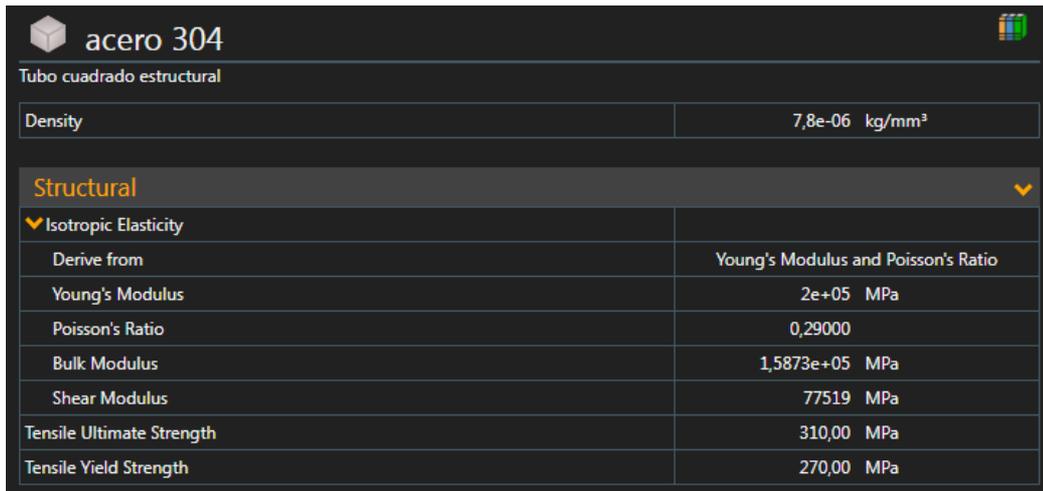
**Figura 32:** Propiedades ASTM A570 grado 36

ASTM A570 Steel, grade 36	
Density	7,8e-06 kg/mm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,1e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,28000
Bulk Modulus	1,5909e+05 MPa
Shear Modulus	82031 MPa
Tensile Ultimate Strength	0,00036500 MPa
Tensile Yield Strength	250,00 MPa

### 3.3.3 Acero 304

El acero inoxidable 304 es la otra propuesta de material para la construcción de la estructura de seguridad FOPS, debido a sus destacadas propiedades mecánicas y su excepcional resistencia a la corrosión (Alcázar, 2004b). Además, como lo menciona (Medina Sanchez et al., 2012), su alta soldabilidad y procesabilidad permiten que el material se adapte a diseños complejos y específicos, asegurando una construcción precisa y eficiente. Por estas razones, este acero es una opción para garantizar la seguridad de la estructura FOPS.

**Figura 33:** Propiedades acero 304



acero 304	
Tubo cuadrado estructural	
Density	7,8e-06 kg/mm <sup>3</sup>
<b>Structural</b>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,29000
Bulk Modulus	1,5873e+05 MPa
Shear Modulus	77519 MPa
Tensile Ultimate Strength	310,00 MPa
Tensile Yield Strength	270,00 MPa

### 3.4 Geometría

En este apartado, se exporta el diseño previamente realizado en un archivo con formato STEP (Standard for the Exchange of Product Data). Este formato estándar es ampliamente utilizado para presentar modelos tridimensionales y se caracteriza por su compatibilidad con la mayoría de los programas de diseño CAD, lo que facilita el intercambio de información entre diferentes programas.

### 3.5 Modelo

En esta etapa, se genera el mallado de elementos finitos en la estructura (Mesh), un proceso crucial para realizar cálculos precisos en las simulaciones.

En este proyecto, se optó por utilizar una malla con un tamaño de elementos de 3 mm, lo que resultó en un total de 2,983,351 nodos y 819,626 elementos.

**Figura 34:** Detalles de malla

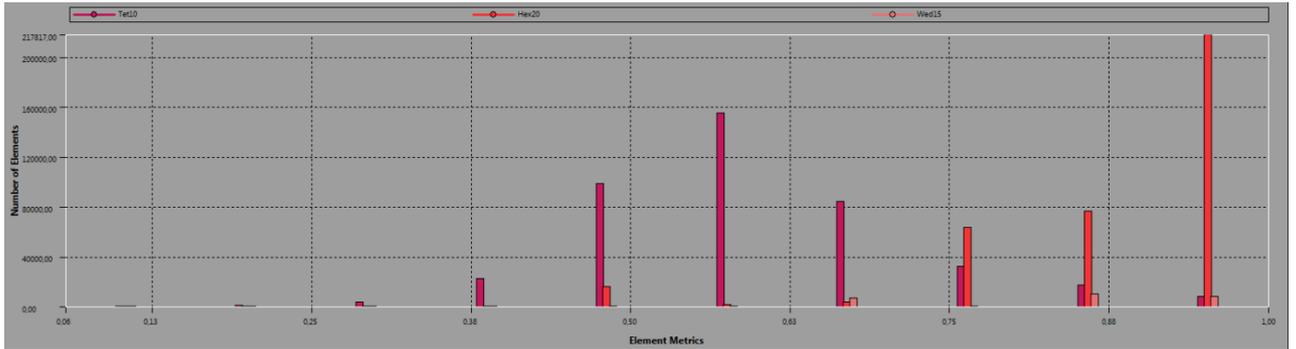
Details of "Mesh"	
Display	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	3, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	2107,6 mm
Average Surface Area	19736 mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	1,5708 mm

Esta configuración permitió alcanzar una calidad de malla (average) de 0.7278, un valor óptimo para este tipo de análisis. Este índice, que evalúa la regularidad y uniformidad de los elementos finitos, se acerca al ideal de 1, lo que garantiza una mayor precisión en la simulación.

**Figura 35:** Detalles del mallado

Details of "Mesh"	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Aggressive Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Element Quality	Default (5,e-002)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	5,666e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99998
<input type="checkbox"/> Average	0,72786
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,17899
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2983351
<input type="checkbox"/> Elements	819626
Show Detailed Statistics	No

**Figura 36:** Calidad de malla – Métrica: (Element Quality)



La métrica de calidad del elemento (Element Quality) evalúa la calidad de la malla en un rango que varía de 0 a 1, representado en el eje horizontal. Como se observa en la Figura 36, la mayoría de las barras se concentran hacia valores cercanos a 1, lo que indica una malla de buena calidad. Este resultado es fundamental, ya que un mallado de mayor calidad garantiza una mejor representación geométrica y precisión en los cálculos, favoreciendo así la obtención de resultados más confiables en la simulación.

### 3.6 Configuración

En este apartado, se definen las condiciones de contorno que tendrá la estructura. Las restricciones incluyen los puntos fijos donde la estructura estará anclada al techo de la excavadora.

Asimismo, se especifican las fuerzas externas que actuarán sobre la estructura, incluyendo su magnitud, dirección y puntos de aplicación. Este paso es crucial, ya que permite replicar las condiciones operativas reales a las que estará sometida la estructura.

La estructura fue sometida a una fuerza de 2227.42 N, calculada mediante la ecuación que define la relación entre el trabajo y la distancia recorrida:

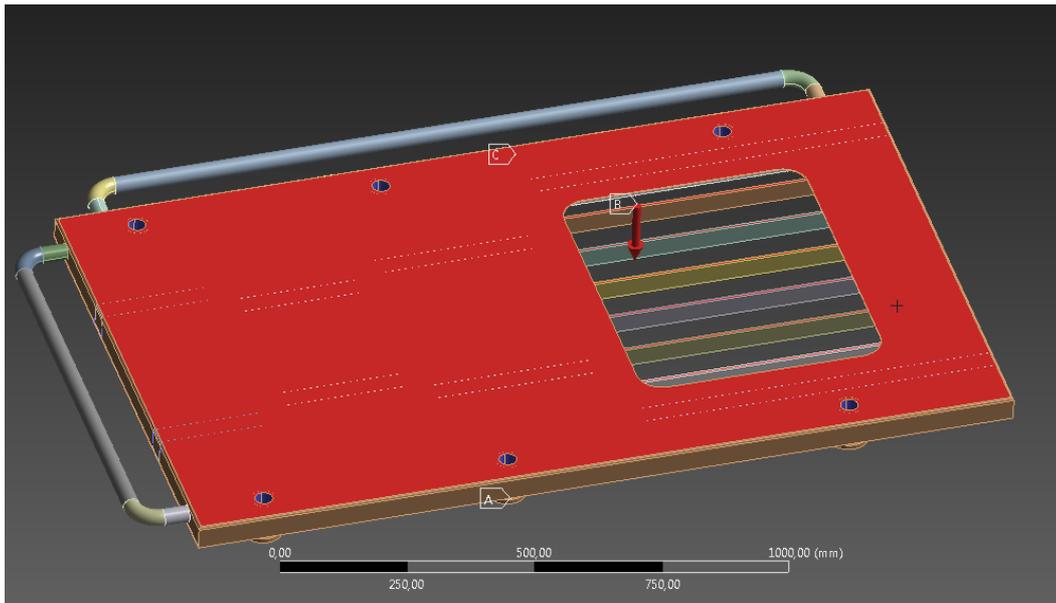
$$Fuerza (N) = \frac{Trabajo(J)}{Distancia (m)} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores:

$$Fuerza (N) = \frac{11600 J}{5,22 m} = 2222,22 N$$

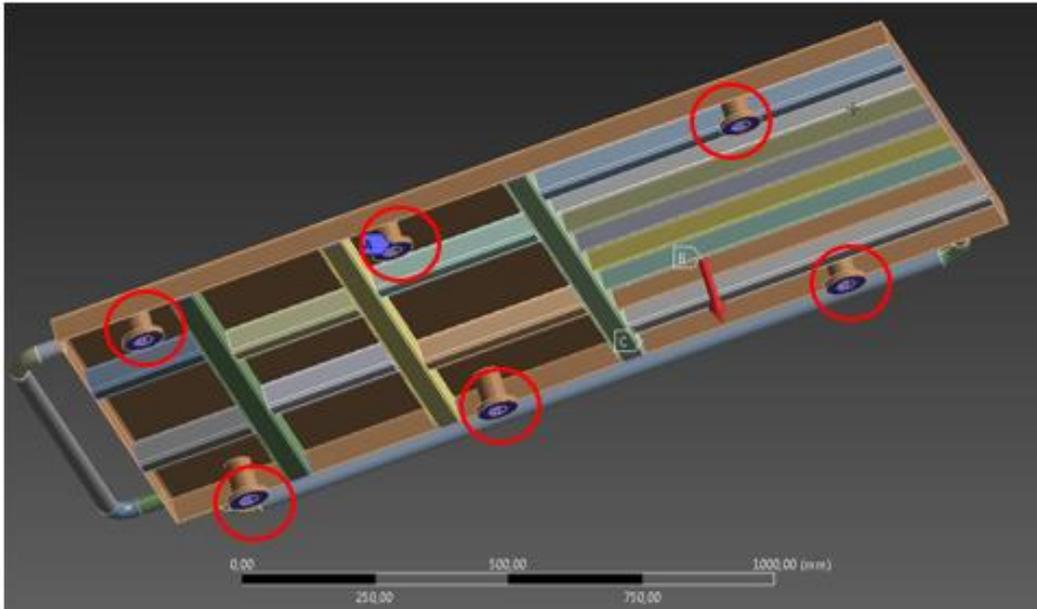
Los datos de trabajo (11600 J) y distancia (5.22 m) fueron determinados como los valores mínimos requeridos según la norma (UNE-EN ISO, 2008), que establece los criterios de resistencia para estructuras sometidas a impactos. Esta fuerza representa la carga mínima que la estructura debe soportar para cumplir con los estándares de seguridad.

**Figura 37:** Área y dirección de la fuerza aplicada



Además, en la Figura 37 se muestra la carga, la cual se aplica de manera uniforme en toda la cara superior de la estructura de seguridad. Este enfoque tiene como objetivo simular el impacto de la caída de objetos, considerando que estos pueden golpear cualquier parte de la estructura. Al distribuir la carga de esta forma, se garantiza una evaluación completa del comportamiento estructural, permitiendo identificar las zonas críticas y verificar que la estructura cumpla con los requisitos de resistencia y seguridad establecidos.

**Figura 38:** Puntos fijos de la estructura



En la Figura 38 se identifican los puntos fijos considerados en el análisis, los cuales corresponden a las bases donde la estructura de seguridad FOPS se ancla al techo de la excavadora. Estos puntos representan las zonas de mayor rigidez del sistema, ya que son responsables de transferir las cargas aplicadas al chasis de la máquina.

### **3.7 Soluciones**

En este apartado se establecen las variables de resultado clave que se esperan obtener tras realizar las simulaciones. Estas variables incluyen parámetros como las deformaciones de la estructura, los esfuerzos generados en diferentes zonas críticas, y el factor de seguridad obtenido bajo las condiciones simuladas.

#### **3.7.1 Deformación total**

La deformación total como lo menciona (Cadavid et al., 2018), es un parámetro que describe el desplazamiento acumulado que experimenta cada punto de una estructura bajo la acción de las cargas aplicadas. Este resultado combina los componentes de desplazamiento en todas las direcciones y proporciona una visión global del comportamiento de la estructura durante la simulación.

#### **3.7.2 Esfuerzo equivalente**

El esfuerzo equivalente o también denominado como esfuerzo de Von Mises, es un criterio utilizado para evaluar si un material fallará bajo un estado de esfuerzos combinado (Amstutz & Novotny, 2010).

Como lo define (Dasso et al., 2010), el criterio de Von Mises es crucial en la ingeniería moderna, ya que permite determinar si un material soportará las cargas aplicadas sin deformarse permanentemente. Esto es especialmente importante en el diseño de estructuras como puentes, edificios y componentes de maquinaria. Como factores que implican en el criterio, el esfuerzo es una medida de la fuerza interna que actúa sobre una unidad de área dentro de un material. La fluencia, en cambio, se refiere al fenómeno donde un material experimenta una deformación permanente bajo una carga constante. Este fenómeno es especialmente relevante en materiales dúctiles como el acero, que pueden deformarse significativamente antes de romperse.

### **3.7.3 Factor de seguridad**

El factor de seguridad es un parámetro utilizado en el diseño estructural tal como lo define (Ríos & Roncancio, 2007), es importante para evaluar la capacidad de una estructura para soportar cargas aplicadas sin alcanzar el punto de fallo del material. Se define como la relación entre la resistencia del material (generalmente el límite elástico o el límite de rotura) y los esfuerzos máximos experimentados en la estructura.

Los límites permisibles del factor de seguridad dependen directamente de las características específicas de cada proyecto, incluyendo las normativas aplicables, los materiales seleccionados y las condiciones de carga a las que estará sometida la estructura (Salazar Trujillo, 2007). Esto implica que, para cada caso, es fundamental establecer los rangos adecuados del factor de seguridad, evaluando si los resultados obtenidos cumplen con los criterios establecidos, garantizan la seguridad requerida y evitan un sobredimensionamiento innecesario que podría aumentar costos o comprometer la eficiencia del diseño.

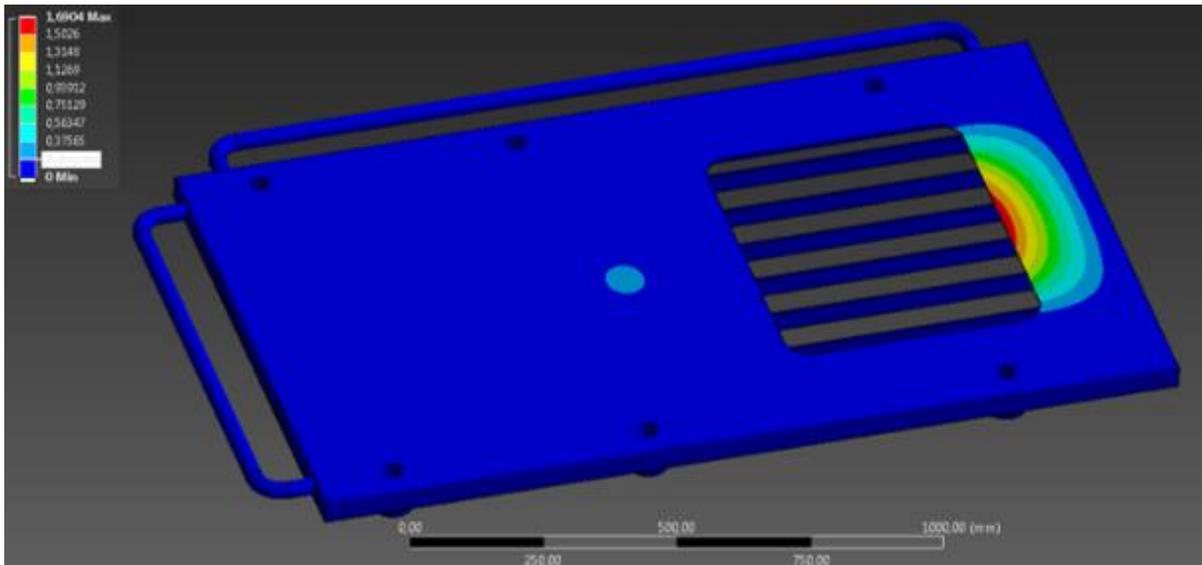
## **3.8 Resultados**

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en ANSYS proporcionan una visión detallada del comportamiento de la estructura FOPS bajo las condiciones de

contorno establecidas. A través de los gráficos de deformación y esfuerzo, es posible identificar las áreas críticas de la estructura y evaluar su capacidad para cumplir con los requisitos de seguridad.

### 3.8.1 Deformación total – Acero ASTM A36

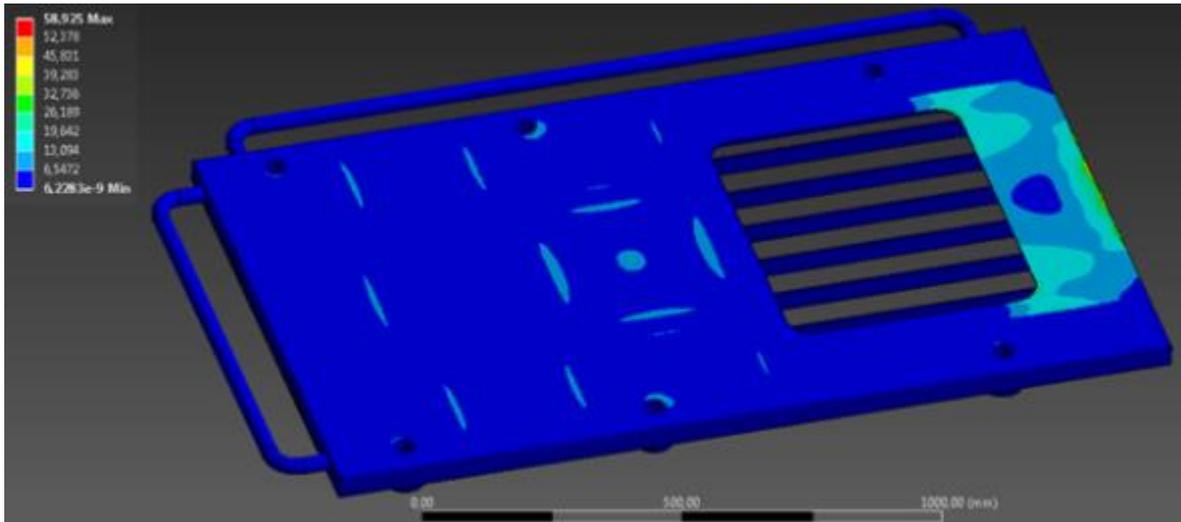
**Figura 39:** Deformación total



La imagen presenta la deformación total en la estructura FOPS bajo la carga definida. Se observa que la mayor deformación se encuentra en la parte delantera de la estructura FOPS, esta deformación alcanza un valor de 1,69 mm, valor el cual permite determinar que no se genera una afectación al espacio de supervivencia del operario.

### 3.8.2 Esfuerzo equivalente – Acero ASTM A36

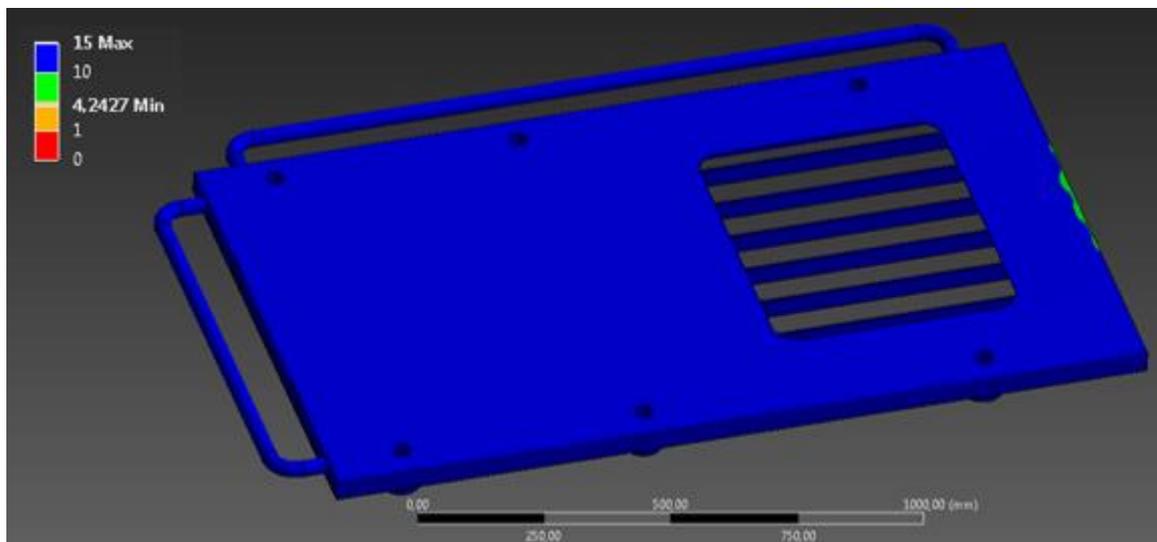
**Figura 40:** Resultado esfuerzo Von Mises



En la Figura 40 se puede evidenciar el esfuerzo de Von Mises de 58,93 MPa, valor el cual se encuentra por debajo del límite elástico a la tracción (250 MPa). En base a este resultado se puede determinar que no existe una deformación permanente o rotura de la estructura de seguridad FOPS.

### 3.8.3 Factor de seguridad – Acero ASTM A36

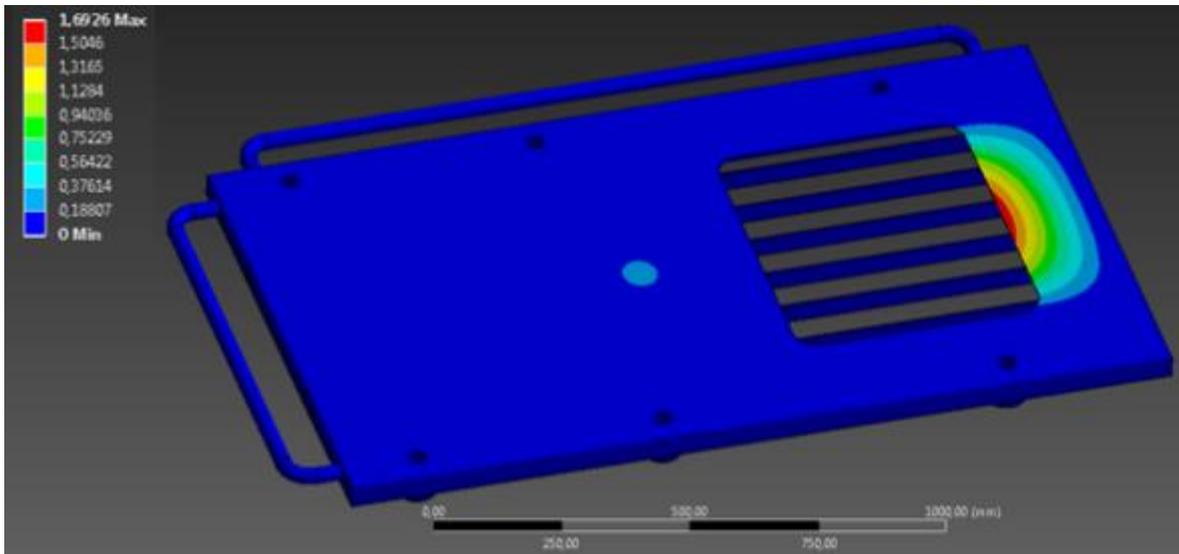
**Figura 41:** Resultado factor de seguridad



En la Figura 41 se evidencia un factor de seguridad de 4,24, resultado el cual nos indica que el sistema de seguridad FOPS soporta eficazmente las condiciones de contorno aplicadas según la norma ISO 3449. Este resultado también nos denota que existe un ligero sobredimensionamiento del sistema, el cual será rediseñado en el capítulo 4.

### 3.8.4 Deformación total – ASTM A570 grado 36

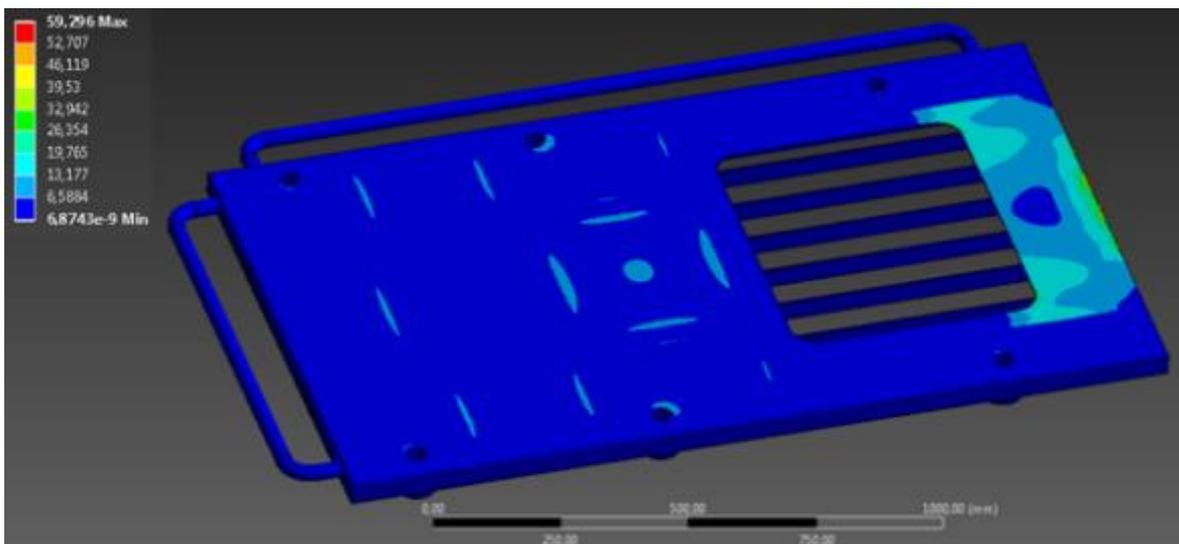
**Figura 42:** Deformación total



La Figura 42 presenta los resultados de la simulación de la deformación total. Se observa que la mayor deformación se concentra en la parte delantera de la estructura FOPS denotada con una coloración roja, alcanzando un valor máximo de 1,69 mm. Este valor es bajo y despreciable, confirmando la robustez de la estructura y garantizando la seguridad del operador en cabina.

### 3.8.5 Esfuerzo equivalente – ASTM A570 grado 36

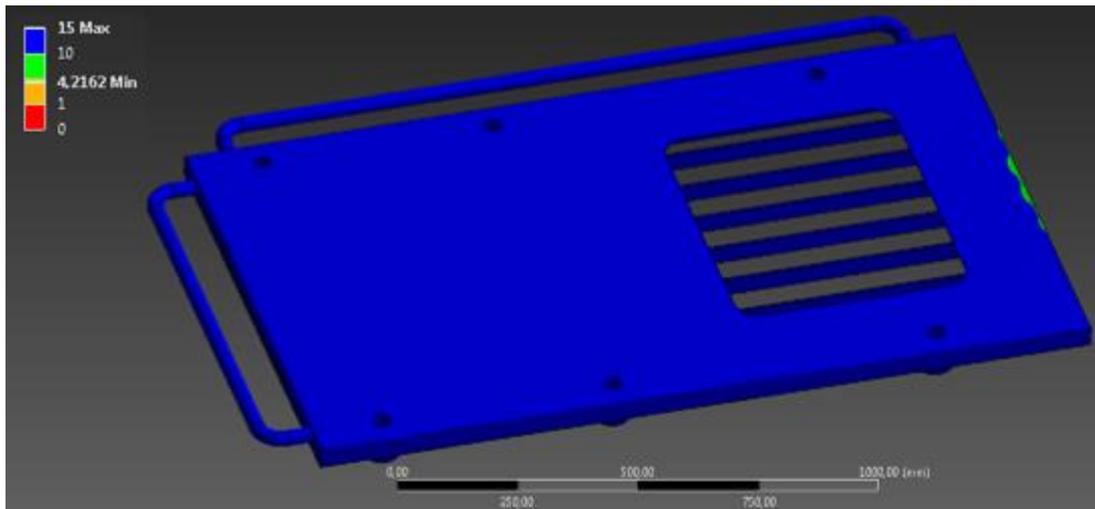
**Figura 43:** Esfuerzo Von Mises



La Figura 43 muestra un esfuerzo de Von Mises de 59.2 MPa, un valor que se encuentra por debajo del límite elástico a la tracción de 250 MPa. A partir de este resultado, se concluye que no se produce deformación permanente ni falla en la estructura de seguridad FOPS.

### 3.8.6 Factor de seguridad – ASTM A570 grado 36

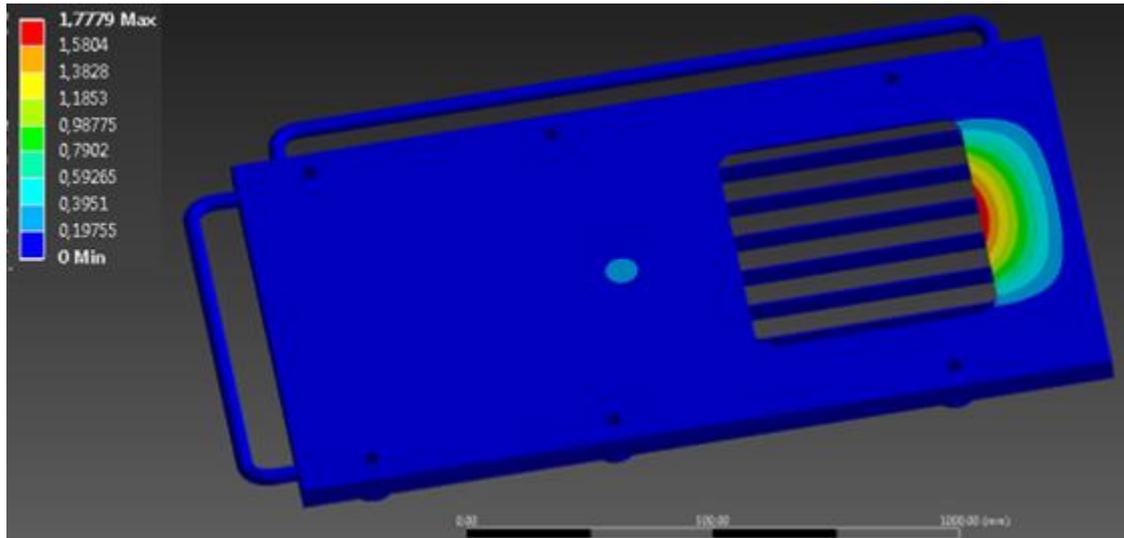
**Figura 44:** Factor de seguridad



La Figura 44 muestra un factor de seguridad de 4,21 lo que indica que el sistema de seguridad FOPS puede resistir de manera eficiente las condiciones de contorno aplicadas conforme a la norma ISO 3449. Este resultado también sugiere un ligero sobredimensionamiento del sistema.

### 3.8.7 Deformación total – Acero 304

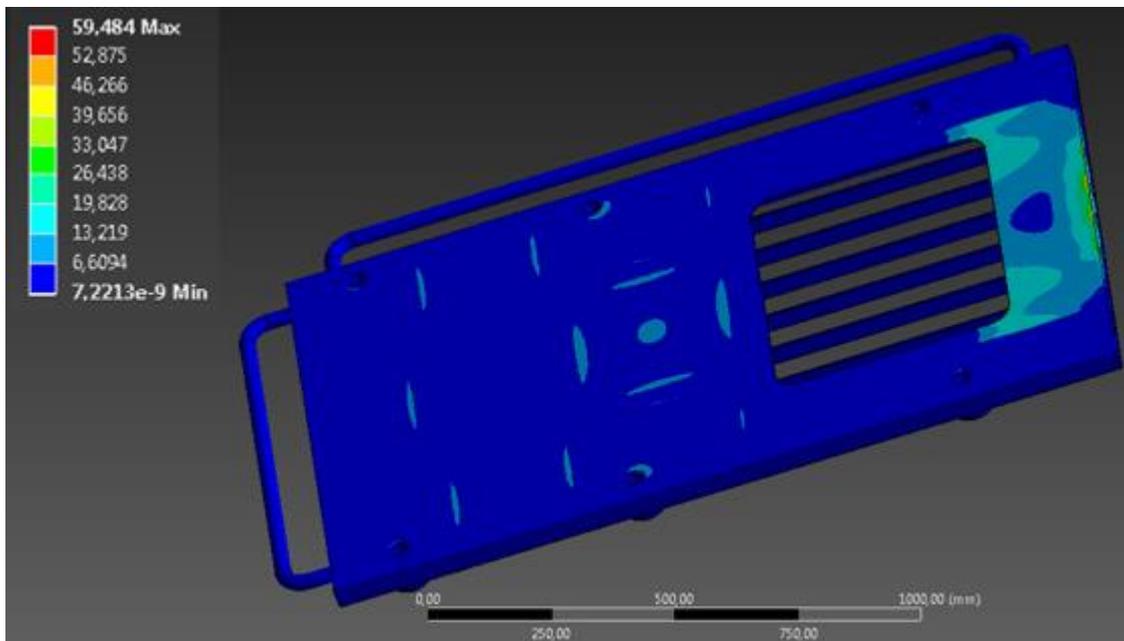
**Figura 45:** Deformación total



La simulación de la deformación total en el acero 304 muestra un valor de 1,78 mm, el cual, aunque ligeramente superior al de los materiales analizados previamente, sigue siendo insignificante. Este resultado confirma que este material también garantiza la seguridad del operador frente a la caída de un objeto.

### 3.8.8 Esfuerzo equivalente – Acero 304

**Figura 46:** Esfuerzo Von Mises

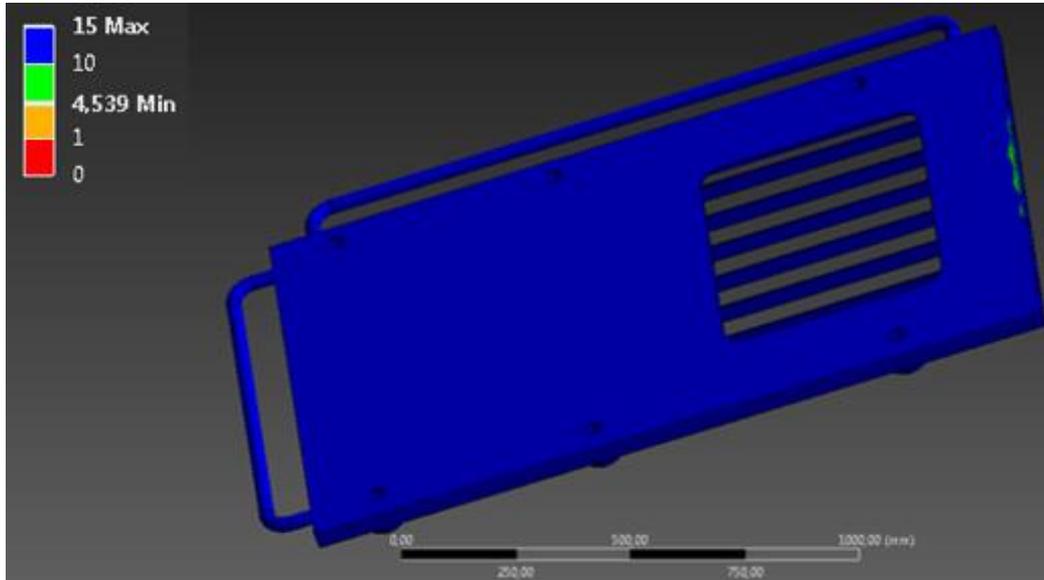


La Figura 46 muestra un esfuerzo de Von Mises de 59.5 MPa, un valor que se encuentra por debajo del límite elástico a la tracción de 270 MPa. A partir de este resultado,

se concluye que no se produce deformación permanente ni falla en la estructura de seguridad FOPS.

### 3.8.9 Factor de seguridad – Acero 304

**Figura 47:** Factor de seguridad



La Figura 47 muestra un factor de seguridad de 4,54, lo que indica que el sistema de seguridad FOPS puede resistir de manera eficiente las condiciones de contorno establecidas por la norma ISO 3449. Al igual que en las simulaciones con los materiales anteriores, este resultado revela un ligero sobredimensionamiento del sistema.

### 3.9 Análisis de convergencia

En este estudio se realizó un análisis de convergencia de malla para evaluar el esfuerzo máximo ejercido sobre el sistema de seguridad FOPS. El proceso involucró siete iteraciones, variando la calidad de la malla y aumentando progresivamente el número de nodos para obtener resultados más precisos. Los datos principales obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 3:** Análisis de convergencia

CALIDAD DE MALLA	NÚMERO DE NODOS	NÚMERO DE SOLUCIÓN	ESFUERZO MÁXIMO (MPa)	TASA DE CONVERGENCIA
0,48	110754	1	20.5	N/A
0,55	129460	2	145.8	611%

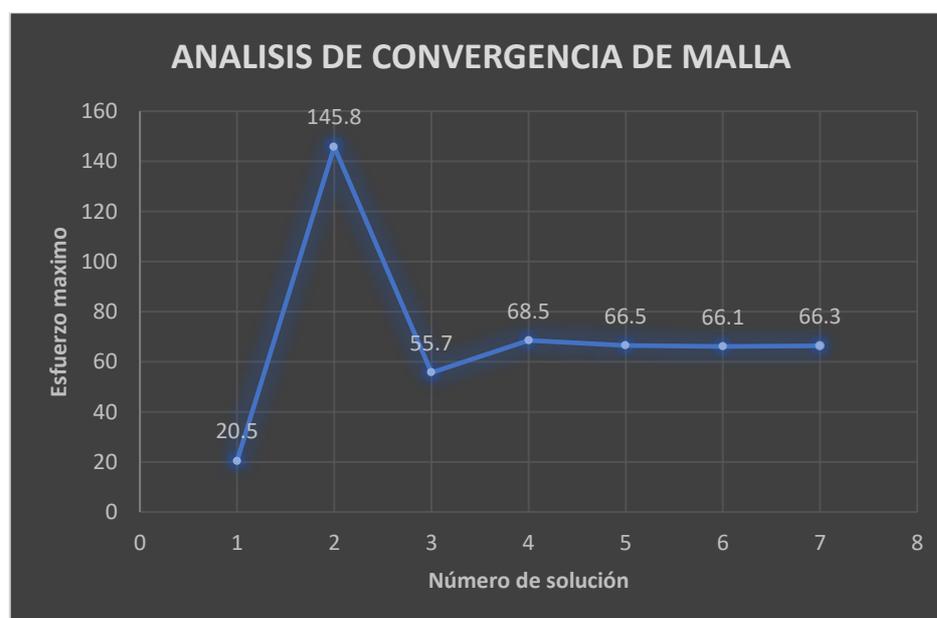
0,66	159355	3	55.7	-62%
0,69	211045	4	68.5	23%
0,70	234766	5	66.5	-3%
0.71	2551341	6	66.1	-1%
0.72	2601441	7	66.3	0%

Durante las primeras iteraciones, el esfuerzo máximo mostró grandes fluctuaciones, pasando de 20.5 MPa en la primera iteración a 145.8 MPa en la segunda, con una tasa de convergencia de 611%. Sin embargo, a partir de la cuarta iteración, el modelo comenzó a estabilizarse, con esfuerzos máximos cercanos a los 66 MPa. Esto indica que la solución ha alcanzado la convergencia, con variaciones mínimas en las últimas iteraciones (-3%, -1% y 0%, respectivamente).

El número de nodos aumentó de forma significativa, pasando de 110,754 en la primera iteración a 260,144 en la séptima, mejorando la calidad de la malla de 0.48 a 0.72. Este refinamiento permitió obtener resultados más precisos y confiables.

Finalmente, se concluye que el esfuerzo máximo convergió a un valor promedio de 66 MPa, lo que representa el comportamiento esperado del sistema de seguridad FOPS en condiciones reales. Este resultado es utilizado para validar el diseño y garantizar su desempeño seguro en aplicaciones prácticas.

**Figura 48:** Análisis de convergencia



## **CAPÍTULO 4**

### **REDISEÑO ESTRUCTURAL**

En este capítulo, se presenta una propuesta orientada al rediseño y mejora de la estructura de seguridad FOPS (Falling Object Protective Structure), basada en los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el capítulo 3. Estas propuestas tienen como objetivo optimizar la resistencia, funcionalidad, sostenibilidad y construcción de la estructura, asegurando un desempeño que cumpla con los estándares establecidos en la normativa ISO 3449.

Una de las propuestas clave para el rediseño de la estructura FOPS es selección de materiales avanzados que permitan mejorar su desempeño estructural. Entre los materiales recomendados se encuentran los aceros de alta resistencia y baja aleación que ofrecen una excelente combinación de resistencia mecánica y ductilidad, reduciendo el peso total de la estructura sin comprometer su capacidad de soportar impactos severos. De igual manera como lo menciona (Medina Sanchez et al., 2012), se puede considerar la implementación de aceros inoxidables con tratamientos térmicos específicos para aumentar su tenacidad y resistencia al desgaste.

#### **4.1 Criterios de rediseño**

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones revelaron que el diseño inicial de la estructura presentaba un ligero sobredimensionamiento. Este fenómeno se refleja en el uso excesivo de material en la estructura FOPS. Para corregir este problema y optimizar el diseño, se optó por reducir las dimensiones de la estructura, enfocándose específicamente en disminuir los espesores de los materiales utilizados.

El objetivo de estas modificaciones fue buscar elementos menos robustos, pero igual de funcionales, logrando así una estructura más ligera y económica en términos de material, facilitando tanto su fabricación como su montaje. Este rediseño asegura el soporte de impactos, mientras se eliminan excesos de material en áreas de menor exigencia.

#### **4.2 Simulación y resultados del rediseño**

Para el rediseño, se decidió reducir el espesor de las paredes de la estructura a 1 mm, con el objetivo de optimizar el uso de material sin comprometer la resistencia estructural requerida. Del mismo modo, los refuerzos internos de la estructura fueron reemplazados por otros con

un menor espesor, buscando un diseño más liviano y eficiente que mantenga la seguridad y funcionalidad.

Para la realización de la simulación se obtuvo un detalle de malla con los siguientes valores:

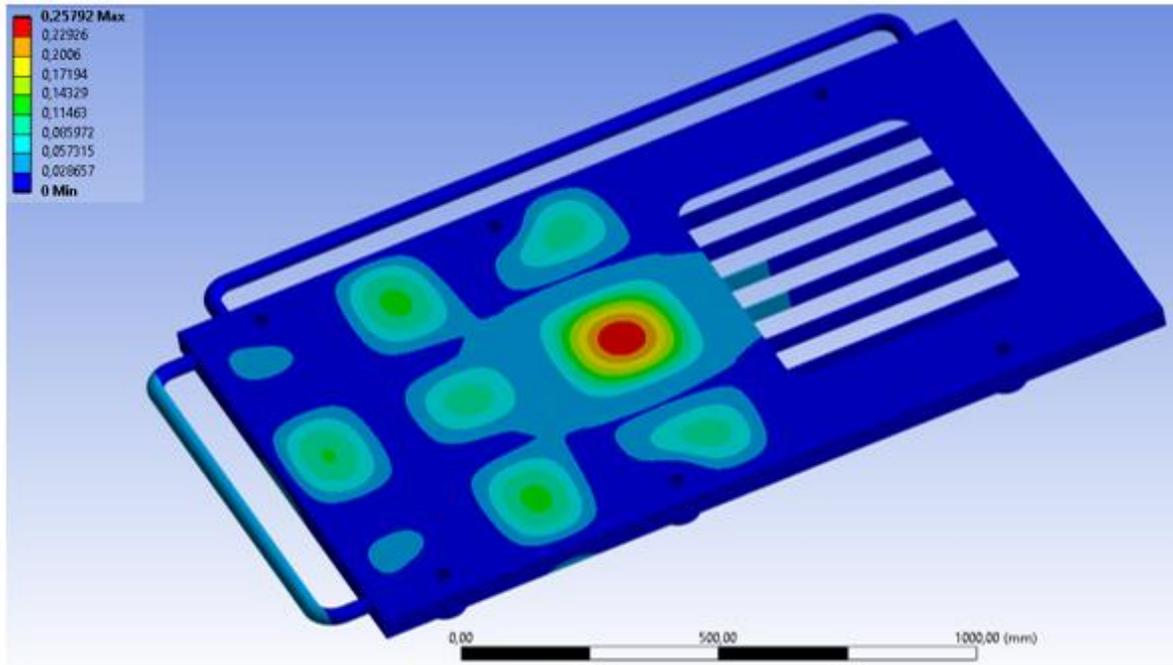
**Figura 49:** Detalles de malla (mesh)

Details of "Mesh"	
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	5,666e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,99998
<input type="checkbox"/> Average	0,71572
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,18186
+ Inflation	
- Advanced	
Number of CPUs for Para...	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refre...	No
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	2601441
<input type="checkbox"/> Elements	744214
Show Detailed Statistics	No

Con la configuración aplicada, se logró una calidad de malla promedio de 0.715, un valor óptimo para el análisis. Además, se generaron 2,601,441 nodos y 744,214 elementos.

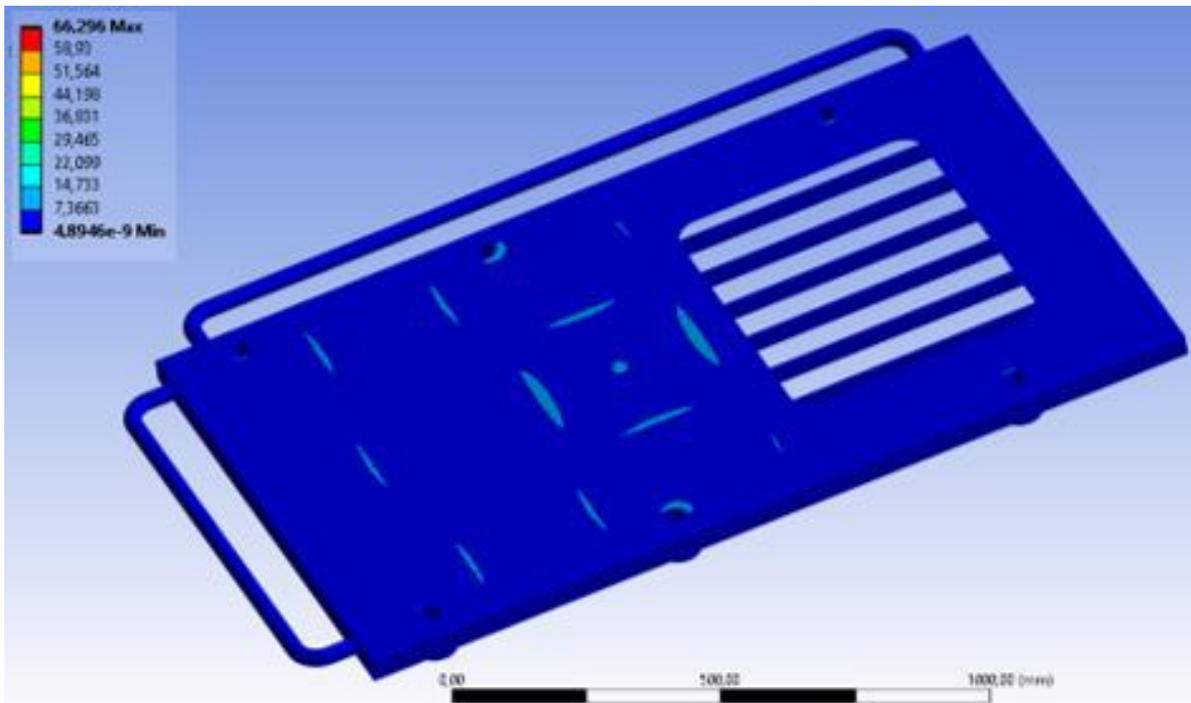
Las simulaciones de rediseño se realizaron con el material ASTM A36, basándose en los resultados presentados en el capítulo 3, los cuales indicaron valores aceptables de deformación y esfuerzos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, los cuales evalúan el desempeño del rediseño en términos de resistencia, deformación y factor de seguridad, asegurando que las modificaciones cumplan con los estándares establecidos.

**Figura 50:** Deformación total estructura rediseñada



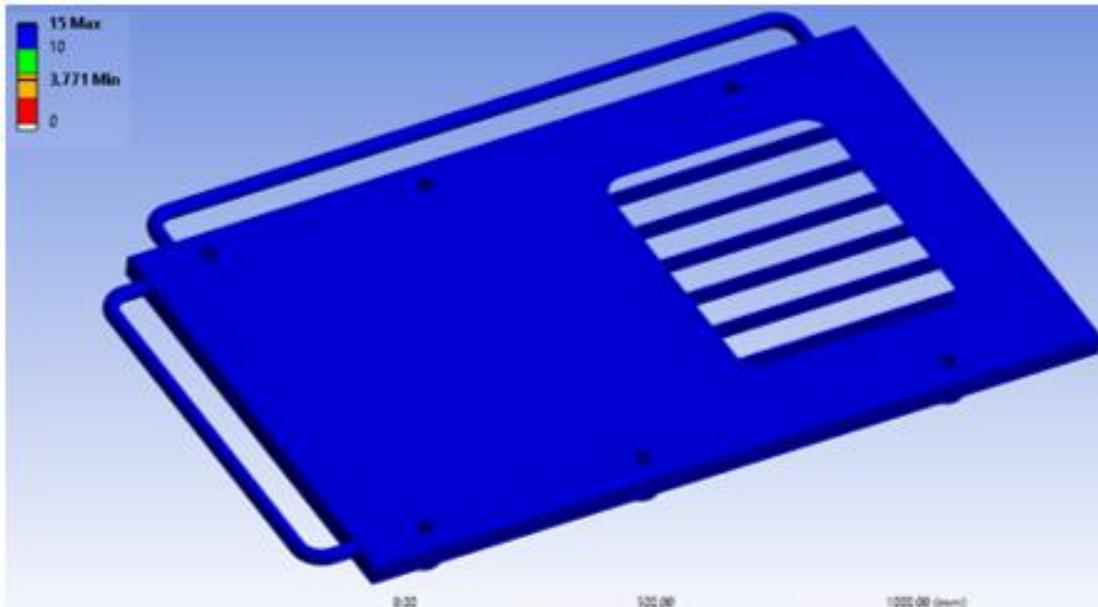
La simulación muestra una deformación máxima de 0,26 mm, un valor que indica que la estructura no experimenta roturas. Este resultado asegura que la integridad estructural se mantenga, garantizando así la seguridad del operador bajo las condiciones de carga simuladas.

**Figura 51:** Esfuerzo Von Mises estructura rediseñada



En cuanto al esfuerzo de Von Mises, el resultado obtenido fue de 66.3 MPa, un valor que se encuentra dentro del límite elástico a la tracción del material, el cual es de 250 MPa. Esto garantiza que no se producirá una deformación permanente.

**Figura 52:** Factor de seguridad estructura rediseñada



La Figura 52, que ilustra el factor de seguridad, muestra un valor de 3.77, el cual es menor al obtenido en las simulaciones del capítulo 3. Este resultado es esperado, por el rediseño de la estructura, lo que sugiere una mejora realizada en el diseño sin comprometer la seguridad.

## CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos de las simulaciones de deformación, esfuerzo y factor de seguridad, se concluye que la estructura de seguridad fabricada con acero ASTM A36 cumple con los requisitos establecidos por la normativa ISO 3449. Con un valor de esfuerzo máximo de 66 MPa, el cual no supera el límite elástico a la tracción de 250 MPa y manteniendo la estructura en zona elástica, garantizando así su desempeño estructural bajo las condiciones de carga simuladas. Además, destaca que el rediseño permitió reducir el valor de deformación total máxima a 0.26 mm el valor más bajo alcanzado en todas las iteraciones de simulación, lo que evidencia una optimización significativa en la resistencia y estabilidad de la estructura
- En cuanto al rediseño de la estructura FOPS, el factor de seguridad obtenido fue de 3.77, ajustándose a más de 2 unidades porcentuales permitiendo que el sistema sea más eficiente y seguro.
- Los resultados destacan la importancia de implementar estructuras de seguridad FOPS en las excavadoras, independientemente del material utilizado. Estas estructuras no solo proporcionan una mayor protección a los operadores al minimizar los riesgos asociados a la caída de objetos durante las operaciones, sino que también contribuyen a aumentar la vida útil de la maquinaria y reducir costos relacionados con accidentes laborales. Además, su adopción fomenta el cumplimiento de estándares de seguridad internacionales, como la ISO 3449.
- A través de iteraciones progresivas de simulación, se logró estabilizar el esfuerzo máximo en un valor de 66 MPa, con variaciones mínimas en la tasa de convergencia (-3%, -1% y 0%), lo que indica que la solución alcanzó la convergencia final. Ante ello se valida que los resultados obtenidos se replicarán de manera fiable en las condiciones reales de operación del sistema de seguridad.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que, en estudios relacionados con las estructuras de seguridad, se considere el uso de materiales con características y especificaciones diferentes a los presentados en este proyecto, a fin de evaluar su desempeño en términos de resistencia, robustez y seguridad. La realización de comparativas permitirá validar los resultados obtenidos en este proyecto y ofrecer una visión más amplia sobre las mejores opciones de materiales para la protección de los operadores.
- Los resultados obtenidos en este proyecto pueden servir como base para una futura investigación centrada en la construcción de la estructura utilizando el material recomendado, acero ASTM A36. Esta siguiente fase de investigación tendría como objetivo verificar los resultados expuestos en este estudio, mediante la fabricación real de la estructura FOPS y la realización de las pruebas de impacto especificadas en la norma ISO 3449.
- Según los datos obtenidos y el análisis realizado en este proyecto, se recomienda el uso de simulaciones computacionales avanzadas mediante software como LS-DYNA y Explicit Dynamics para proyectos similares. Estas herramientas permiten modelar con alta precisión las condiciones de impacto, evaluando parámetros críticos como las deformaciones, tensiones, distribución de esfuerzos y el factor de seguridad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ABASOLO BILBAO, M., AGUIRREBEITIA CELAYA, J., CORIA MARTÍNEZ, I., & HERAS MIGUEL, I. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Alcázar, G. A. P. (2004a). Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al," Fermanal". *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 265–274.
- Alcázar, G. A. P. (2004b). Propiedades estructurales y magnéticas de aceros Fe-Mn-Al," Fermanal". *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 265–274.
- Amstutz, S., & Novotny, A. A. (2010). Topological optimization of structures subject to von Mises stress constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 407–420.
- Autoridad Portuaria de Manta. (2021). *Vehículos y Maquinarias movilizadas en Buques Portavehículos en el Terminal Internacional de APM*. <https://datosabiertos.gob.ec/dataset/vehiculos-y-maquinarias-movilizadas-en-buques-portavehiculos-en-el-terminal-internacional-de-apm>
- Banco Central del Ecuador. (2022). *BOLETÍN DE SECTOR MINERO*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ReporteMinero072022.pdf>
- Cadavid, C. T., Arcila, I. D. P., & Vélez, K. L. (2018). Análisis por elementos finitos del desempeño estructural de jaula de seguridad para vehículo Renault Logan bajo normatividad FIA. *Revista Cintex*, 23(2), 35–53.
- Celigüeta-Lizarza, J. T. (2011). *Método de los elementos finitos para análisis estructural*.
- Dasso, G. M., Amé, R. M., & Lezama, D. H. (2010). Determinación de las tensiones localizadas de Von Mises producidas por discontinuidades geométricas combinadas en estados complejos de tensión. *Actas Del Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, IIº CAIM-2010*.
- Dumitrache, P. (2011). PARAMETRIC MODELLING OF THE ROPS/FOPS PROTECTIVE STRUCTURES GEOMETRY IN ORDER TO STUDY OF THEIR BEHAVIOUR USING FINITE ELEMENT METHOD. *Journal of Industrial Design & Engineering Graphics*, 6(2).
- Fatosla C.A. (2021). *Excavadora Hyundai HX220S*. <https://fatosla.com/?product=r220lc-9s-22-toneladas>
- GHEORGHE, G., PERSU, C., MIHAI, M., CUJBESCU, D., BIRIŞ, S., & MAICAN, E. (2018). *THEORETICAL SIMULATION FOR PROTECTIVE STRUCTURE OF OPERATOR CABIN AGAINST FALLING OBJECT*.

- HD HYUNDAI CONSTRUCTION EQUIPMENT. (n.d.). *HYUNDAI HX220S*.
- Hernandez, E., Perez, A. S. S., Atilano, A. L., & Sandoval, J. M. M. (2021). Torsión, esfuerzos y deformaciones. *TEPEXI Boletín Científico de La Escuela Superior Tepeji Del Río*, 8(16), 43–47.
- Inventor, A., & Tooling, A. I. (2002). *Autodesk®*.
- ISO. (2009). *ISO 7135:2009(en)*.
- ISO. (2013). *ISO 3164*.
- Kaneda, S., & Tamagawa, T. (2003). Introduction of simulation of falling object protective structures. *Technical Report*, 49, 151.
- KOKOT, G., & OGIERMAN, W. (2019). The numerical simulation of FOPS and ROPS tests using LS-DYNA. *Mechanics*, 25(5), 383–390.
- Kumar, U., Rudresh, M., & Maruthi, B. H. (2014). Design Optimization of CAB Roof for Rops and Fops Failure. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 1(1).
- MatWeb. (n.d.). *Recurso de información de materiales en línea - MatWeb*. Retrieved December 26, 2024, from <https://www.matweb.com/es/>
- Medina Sanchez, E., Cobo Escamilla, A., & Martínez Bastidas, D. (2012). Evaluación del comportamiento estructural y de resistencia a la corrosión de armaduras de acero inoxidable austenítico AISI 304 y dúplex AISI 2304 embebidas en morteros de cemento Portland. *Revista de Metalurgia*, 48(6), 445–458.
- Pereiro, L. L. O. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. *Ingeniería Mecánica*, 9(3), 7–13.
- Ríos, L. C., & Roncancio, E. (2007). Análisis y desarrollo de un programa de selección rápida de factores de seguridad, para diseño de elementos mecánicos. *Scientia et Technica*, 1(35).
- Rivera Chica, L. E. (2017). *Elaboración de un manual de seguridad para la operación de equipo y maquinaria pesada en la construcción de vías; caso de estudio: proyecto prolongación de la Simón Bolívar*.
- Salazar Trujillo, J. E. (2007). Resistencia de materiales básica para estudiantes de ingeniería. *Departamento de Ingeniería Civil*.
- SEOPAN. (2010, March). *Fichas informativas para la Prevención de riesgos laborales en la utilización de equipos*. 1. <https://seopan.es/wp-content/uploads/2024/11/ficha-informativaVOL-I.pdf>

- Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2018). *Engineering analysis with ANSYS software*. Butterworth-Heinemann.
- UNE-EN ISO. (2008). *UNE-EN ISO 3449:2008*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042297>
- Valenzuela, E. E. M., & Torres, M. C. F. R. (2016). Demostración por Análisis de Elemento Finito de los Esfuerzos Máximos Permisibles en Placa de Acero ASTM A36. *Revista de Difusión Técnico Científico Del Instituto Tecnológico de Hermosillo Espacio ITH | Volumen, 6(1), 28.*

**ANEXOS.**

