

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TÍTULO DE TESIS

**OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE PLUMA Y BRAZO
EN EXCAVADORA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

TESIS

QUE PARA OBTENER TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA:

C. BOBADILLA LÓPEZ ANGEL

DIRECTOR

DR. MARIO IBAÑEZ OLVERA

ASESOR

DR. GENARO LÓPEZ GAMBOA

I. DEDICATORIA

Le quiero dedicar mi trabajo y mis logros a mi mascota Romina, que hoy descansa y me acompaña desde el corazón pero que siempre fue mi motivación para salir adelante.

II. AGRADECIMIENTOS

Desde niño me han enseñado a dar gracias y tener presente que los retos que me pone la vida son para aprender y salir adelante, y todo esto se lo debo a mis padres;

- Lázaro Bobadilla Paredes
- Teresita López Catzoli

Que con su esfuerzo y sacrificio me impulsado a salir adelante y que nada de esto hubiese sido posible de no ser por su comprensión, perseverancia, cariño y consejos que me han impulsado a salir adelante y mejorar constantemente.

De igual forma agradezco su paciencia y apoyo a mis Hermanos, Familia, Amigos, Compañeros, así como a los Ingenieros, Maestros y Doctores que fungieron como docentes, Amigos y guías en mi preparación, destacando a las siguientes personas que han influido en gran manera a mí.

Al Dr. Mario Ibañez, Dra. Bethsabet Jaramillo y Mstra. Diana Rivera, Que impartieron en mi no solo un roll de docencia y aprendizaje, sino que también una relación de amistad, compañerismo y apoyo personal, dando me el honor de llamar los amigos, estare siempre agradecido.

A mis amigos, Axel González, Rodrigo González, Josefina Castañeda, Aldo Albarrán y grandes buenas amistades que realice, gracias a su compromiso, lealtad y seguimiento, hicieron más amena y productiva mi estancia y formación dentro de la carrera.

Y, por último, quiero agradecerle todo el apoyo, cariño y motivación que me ha brindado a mi novia, una vida no bastara para agradecerte por todo lo bueno que hemos compartido y no dejarme decaer ante las adversidades que hemos presentado.

Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes. Este trabajo es el resultado de un sinfín de acontecimientos que poco tuvieron que ver con lo académico, sino más bien, con la pasión y amor y respeto que les tengo.

Gracias infinitas a ustedes y, por supuesto, a la vida, por ponerlos en mi camino.

III. RESUMEN

La optimización topológica de la pluma y el brazo de excavadoras es un proceso esencial para mejorar su rendimiento y resistencia. En este proyecto se realiza un enfoque en la simulación numérica mediante el software de *ANSYS Workbench* para identificar los puntos críticos de esfuerzo, tensión y deformación en partes clave de la excavadora. Una vez identificados, estos puntos guían el proceso de redistribución eficiente de material a través de la optimización topológica.

El resultado es un diseño más ligero y resistente que maximiza la eficiencia operativa de las excavadoras a escala, reduciendo el peso innecesario y garantizando un rendimiento óptimo. Este enfoque combina la potencia de la simulación numérica con la ingeniería de precisión para lograr excavadoras más eficientes y confiables en una escala reducida.

La convergencia de la optimización topológica (OT), la simulación numérica y la manufactura aditiva está transformando la industria de la ingeniería y la maquinaria pesada, enfocándonos especialmente en construcción de excavadoras. Estas tecnologías están redefiniendo cómo se diseñan y construyen componentes críticos como la pluma y el brazo de excavadoras, con un enfoque en la eficiencia, la sostenibilidad y el rendimiento.

La OT es clave para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las excavadoras, reduciendo al mismo tiempo su peso y manteniendo su resistencia estructural. Se basa en principios matemáticos y algoritmos avanzados para lograr una distribución óptima de material en la estructura, maximizando su rendimiento y minimizando su peso.

La simulación numérica respalda la OT permitiendo explorar virtualmente numerosas configuraciones y geometrías para lograr una distribución óptima de material en la pluma y el brazo de las excavadoras. Esto resulta en una reducción significativa del peso, lo que a su vez reduce el consumo de recursos y la huella ambiental.

La manufactura aditiva se utiliza para implementar estos diseños optimizados, creando componentes más ligeros, resistentes y eficientes. Estas tecnologías están revolucionando la industria de la maquinaria pesada, permitiendo la creación de excavadoras más eficientes, económicas y sostenibles.

IV. ABSTRACT

The optimization topologic of the pen and arm of excavators is an essential process to improve their performance and resistance. In this project, a focus is placed on numerical simulation using *ANSYS Workbench* software to identify critical points of stress, tension, and deformation in key parts of the excavator. Once identified, these points guide the process of efficient material redistribution through topological optimization. The result is a lighter and stronger design that maximizes the operational efficiency of scale excavators, reducing unnecessary weight and ensuring optimal performance. This approach combines the power of numerical simulation with precision engineering to achieve more efficient and reliable excavators on a reduced scale.

The convergence of topological optimization (TO), numerical simulation, and additive manufacturing is transforming the engineering and heavy machinery industry, particularly focusing on excavator construction. These technologies are redefining how critical components such as the pen and arm of excavators are designed and built, with a focus on efficiency, sustainability, and performance.

TO is key to improving the efficiency and performance of excavators while simultaneously reducing their weight and maintaining their structural strength. It is based on mathematical principles and advanced algorithms to achieve an optimal distribution of material in the structure, maximizing its performance and minimizing its weight.

Numerical simulation supports TO by allowing the virtual exploration of numerous configurations and geometries to achieve an optimal distribution of material in the pen and arm of excavators. This results in a significant reduction in weight, which in turn reduces resource consumption and environmental footprint.

Additive manufacturing is used to implement these optimized designs, creating lighter, stronger, and more efficient components. These technologies are revolutionizing the heavy machinery industry, enabling the creation of more efficient, economical, and sustainable excavators.

ÍNDICE

I.	DEDICATORIA.....	I
II.	AGRADECIMIENTOS	II
III.	RESUMEN.....	III
IV.	ABSTRACT	IV
	ÍNDICE	V
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
V.	INTRODUCCIÓN	1
VI.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
VII.	JUSTIFICACIÓN.....	7
VIII.	OBJETIVOS.....	10
	Objetivo general	10
	Objetivos específicos.....	10
	CAPÍTULO I. GENERALIDADES	11
	1.1 Antecedentes	11
	1.2 Topología	12
	1.2.1 Tipos de optimización	12
	1.2.1.1 Optimización paramétrica	13
	1.2.1.2 Optimización de forma.....	14
	1.2.1.3 Optimización topológica	14
	1.3 Optimización Topológica.....	14
	1.3.1 Optimización topológica en componentes estructurales mecánicos.....	16
	1.3.2 Optimización topológica de una viga con cargas y punto fijo.....	18
	1.4 Simulación numérica.....	20
	1.4.1 Simulación de maquinaria industrial	20
	1.4.2 Ingeniería estructural de maquinaria pesada.....	21
	1.4.3 Ingeniería estructural de equipos.....	22

1.4.4	Geometría de triángulos en las estructuras	22
1.5	Industria 4.0.....	23
1.6	Principales tecnologías emergentes de la industria 4.0	25
1.7	Manufactura inteligente.....	26
1.8	Softwares de optimización topológica	26
1.9	Excavadoras	28
1.9.1	Capacidades de carga de la excavadora.....	33
1.9.2	Material empleado.....	33
1.9.3	Innovación de las excavadoras	36
1.9.4	Tecnología Topcon.....	38
1.10	Optimización topológica en ANSYS	39
1.10.1	Principios de caracterización en el software	40
1.10.2	Soporte con casos de carga.....	45
1.10.3	Reporte del primer criterio.....	49
1.10.4	Optimización por capas de nivel.....	50
	CAPITULO II. METODOLOGÍA	53
2.1	Introducción a SolidWorks.....	53
2.2	CAD de la pluma y brazo de excavadora.....	53
2.2.1	Diseño de brazo.....	54
2.2.2	Diseño de pluma.....	55
2.2.3	Definición de componentes.....	56
2.2.4	Ensamble del sistema.....	59
2.3	Introducción a Ansys (Ansys Workbench)	60
2.3.1	Configuración de Ansys Workbench.....	60
2.4	Ansys Mechanical	62
2.4.1	Configuración de los análisis estructurales en el diseño completo.....	64
2.4.2	Configuración de los análisis estructurales solo en la pluma y el brazo.....	68
2.4.3	Configuración para la optimización topológica del diseño completo.....	70
2.4.4	Configuración para la optimización topológica en la pluma y el brazo	72

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSION	73
3.1 Análisis en los casos de carga	74
3.2 Análisis estructurales del diseño completo	75
3.2.1 Primer caso de análisis	75
3.2.2 Análisis del segundo caso.....	76
3.2.3 Análisis del tercer caso.....	77
3.3 Análisis estructurales de la pluma y brazo	79
3.4 Optimización topológica en las piezas a la introducción de ANSYS	80
3.4.1 Optimización de la repisa	80
3.4.2 Optimización en los casos de carga.....	83
3.4.3 Optimización por capas	84
3.5 Optimización topológica del brazo completo.....	84
3.5.1 Optimización topológica de la pluma al 38%.....	85
3.5.2 Optimización topológica del brazo al 85%.....	86
3.6 Optimización topológica de la pluma y el brazo	88
3.6.1 Optimización topológica al 25%	88
3.6.2 Optimización topológica al 50%	89
3.6.3 Optimización topológica al 75%	90
3.6.4 Optimización topológica al 58%	90
3.7 Comparación de optimizaciones	92
3.7.1 Comparación en la optimización del brazo	92
3.7.2 Comparación entre las plumas.....	94
CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1 Conclusión.....	96
4.1 Recomendaciones.....	97
CAPITULO V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
CAPITULO VI. ANEXOS.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Categorías de optimización estructural:.....	13
Figura 2 Componente mecánico analizado	16
Figura 3 Dominio de cálculo	17
Figura 4 Estructura generada por optimización topológica	17
Figura 5 Interpretación del componente mecánico	18
Figura 6 Esfuerzo del elemento mecánico	18
Figura 7 Representación del puente	19
Figura 8 Pieza optimizada del puente	19
Figura 9 Ejemplo de deformación al aplicar fuerzas en triangulo y cuadrados	23
Figura 10 Modelo de excavadora frontal - Modelo Liv Gong 922E.....	30
Figura 11 Modelo de excavadora de cuchara bivalva-Modelo KINSHOFER C18VE.....	30
Figura 12 Modelo de excavadora de pluma telescópica-Modelo Relong RLTA230.....	31
Figura 13 Descripción de partes de pluma y brazo	31
Figura 14 Pluma monobloque	32
Figura 15 Pluma con brazo intermedio	32
Figura 16 Primera excavadora de vapor - William Otis - 1835	37
Figura 17 Diseño de la pieza "Repisa"	41
Figura 18 Panel de Workbench para la configuración de la optimización.....	41
Figura 19 Asignación del material para la repisa	42
Figura 20 Soporte del vértice en la repisa	42
Figura 21 Asignación -400N de fuerza en eje Y	43
Figura 22 Generación de momento de 500Nm	43
Figura 23 Exclusión de soporte en la plancha del soporte	44
Figura 24 Restricción de la masa para definir el porcentaje del análisis	44
Figura 25 Porcentaje de restricción al 110 % de la optimización para la plancha	44
Figura 26 Porcentaje de restricción al 25 % de la optimización para el soporte.....	44
Figura 27 Panel en Workbench para el análisis multi-estatico	45

Figura 28 Asignación del sistema de unidades y determinación de escala para la malla	45
Figura 29 Pieza con malla de 3mm	46
Figura 30 Soporte y fuerza de 11N para el primer análisis estático.....	46
Figura 31 Soporte y fuerza de 1N para el segundo análisis estático	47
Figura 32 Desplazamiento remoto con fuerza de 1N para el tercer análisis estático	47
Figura 33 Asignación de cuerpos para la región de optimización	48
Figura 34 Objetivo de optimización.....	48
Figura 35 Restricción del 35 %.....	48
Figura 36 Configuración para el criterio en Workbench.....	49
Figura 37 Asignación de criterio primario en la pieza	49
Figura 38 Asignación de la región para la optimización estructural.....	50
Figura 39 Límites a la respuesta del criterio	50
Figura 40 Panel de Workbench para la optimización por niveles.....	51
Figura 41 Definición del tamaño de la malla a 5mm	51
Figura 42 Empotramiento de la pieza	52
Figura 43 Aplicación de 25000N de fuerza en el eje Z.....	52
Figura 44 Detalles de las optimizaciones, por nivel y por densidad	52
Figura 45 CAD de pluma y brazo de excavadora en SolidWorks	53
Figura 46 CAD del brazo de excavadora	55
Figura 47 CAD de la pluma de excavadora	55
Figura 48 CAD de la base	56
Figura 49 Diseño del Bulón	57
Figura 50 Diseño del Tensor	57
Figura 51 Ensamble del pistón.....	57
Figura 52 Diseño del estabilizador.....	58
Figura 53 Diseño de cuchara para la excavadora.....	58
Figura 54 Brazo ensamblado en SolidWorks.....	59
Figura 55 Recuadro para la geometría en Workbench.....	60
Figura 56 Recuadros del análisis "Static Structural" en Workbench	61
Figura 57 Configuración de recuadros en Workbench.....	61

Figura 58 Panel de Ansys Mechanical	62
Figura 59 Barra de configuraciones en “Ansys Mechanical”	63
Figura 60 Configuración de material	63
Figura 61 Asignación del material de acero estructural	64
Figura 62 Configuración de malla aplicándola a todos los componentes	64
Figura 63 Visualización con la pieza enmalla.....	64
Figura 64 Sujeción en el bulón de la excavadora.....	65
Figura 65 Fuerzas aplicadas en el primer pistón	65
Figura 66 Sujeción del brazo a la pluma mediante el sistema hidráulico	66
Figura 67 Sujeción en la base de la pluma	66
Figura 68 Asignación de fuerza y sujeción para el 2do pistón.....	66
Figura 69 Asignación de puntos fijos en el 3er sistema de análisis estructural	67
Figura 70 Sujeción del eslabón que va en la base	68
Figura 71 Asignación de fuerzas en la pluma	68
Figura 72 Sujeción del brazo al sistema hidráulico.....	69
Figura 73 Sujeción del brazo a la pluma	69
Figura 74 Asignación de fuerzas en el área de trabajo.....	69
Figura 75 Recuadros para la configuración de la optimización	70
Figura 76 Región para la optimización del brazo	70
Figura 77 Región para la optimización de la pluma.....	70
Figura 78 Objetivo de las optimizaciones	71
Figura 79 Asignación del 85% de masa	71
Figura 80 Asignación del 38% de masa	71
Figura 81 Región de ambas piezas optimizadas.....	72
Figura 82 Definición en el tipo de optimización.....	72
Figura 83 Barra de resultados.....	73
Figura 84 Configuración para la solución de los análisis estáticos.....	73
Figura 85 Deformación del primer caso de carga	74
Figura 86 Deformación del segundo caso de carga.....	74

Figura 87 Deformación del tercer caso de carga.....	74
Figura 88 Resultados del primer análisis estático	76
Figura 89 Segundo análisis estático	77
Figura 90 Tercer caso de análisis	78
Figura 91 Deformación de pluma.....	79
Figura 92 Deformación de Brazo	80
Figura 93 Pieza repisa para la OT	80
Figura 94 Optimización de la base para la repisa.....	81
Figura 95 Optimización del soporte	81
Figura 96 Repisa optimizada.....	82
Figura 97 Resultado de la optimización en base	82
Figura 98 Resultado de la optimización el soporte	82
Figura 99 Optimización del caso de cargas.....	83
Figura 100 Resultados de la optimización	83
Figura 101 Diferencia entre la optimización por capas y por densidad	84
Figura 102 Optimización de la pluma al 38%.....	85
Figura 103 Resultados en la optimización de la pluma.....	86
Figura 104 Optimización del brazo al 85%.....	87
Figura 105 Resultados de la optimización de brazo.....	87
Figura 106 Optimización Topológica 25 %	88
Figura 107 Optimización Topológica 50 %	89
Figura 108 Optimización Topológica 75 %	90
Figura 109 Optimización Topológica 58 %	91
Figura 110 Resultados iniciales y finales de la optimización	91
Figura 111 Primer caso en la optimización del brazo	92
Figura 112 Resultados de la primera optimización del brazo	93
Figura 113 Segunda optimización del brazo	93
Figura 114 Resultados de la segunda optimización del brazo	94
Figura 115 Primer caso en la optimización con de la pluma	95

V. INTRODUCCIÓN

En el mundo de la ingeniería y la maquinaria pesada, la optimización topológica, la simulación numérica y la manufactura aditiva están convergiendo en una sinergia que está redefiniendo por completo la forma en que concebimos y construimos componentes críticos como la pluma y el brazo de excavadoras, especialmente en el contexto de modelos a escala. Esta convergencia de tecnologías representa un gran interés en la búsqueda constante de la eficiencia, la sostenibilidad y el rendimiento en la industria de la construcción y la maquinaria pesada.

La optimización topológica (OT) es una técnica fundamental en el diseño de maquinaria pesada como excavadoras a escala, ya que permite mejorar la eficiencia y rendimiento de estos equipos al tiempo que se reduce el peso y se conserva la resistencia estructural necesaria. En este contexto, la optimización topológica de la pluma y el brazo de una excavadora a través de la simulación numérica se presenta como una solución innovadora y prometedora. En este trabajo, exploraremos cómo esta metodología puede revolucionar la industria de la construcción, permitiendo la creación de excavadoras más eficientes, económicas y resistentes, con un enfoque en la aplicación de técnicas de simulación numérica para lograr este objetivo.

La disciplina de la OT ha transformado radicalmente la forma en que diseñamos y fabricamos los componentes en una amplia gama de industrias. En este caso, se trata de una técnica de ingeniería que busca encontrar la mejor distribución de material en la pluma y el brazo de las excavadoras, con el objetivo de mejorar su rendimiento y eficiencia, al tiempo que se reduce el peso y se minimiza el uso de recursos con técnicas vanguardista basadas en principios matemáticos y algoritmos avanzados para lograr la distribución óptima de material en una estructura, con el objetivo de maximizar su rendimiento, minimizar el peso y optimizar la eficiencia, sin comprometer la integridad estructural.

La OT, respaldada por simulaciones numéricas, nos brinda la capacidad de explorar virtualmente innumerables configuraciones y geometrías para lograr una distribución óptima de material en la pluma y el brazo de las excavadoras. Este enfoque de diseño rompe con los paradigmas establecidos al permitir que la forma de una estructura evolucione de manera orgánica, eliminando material redundante y enfocándose únicamente en áreas críticas de carga y tensión. El resultado es

una reducción significativa en el peso, lo que conlleva a una mayor eficiencia en el consumo de recursos y una menor huella ambiental.

Por otra parte, las tecnologías sobre simulación numérica y los algoritmos sobre la OT avanzan como una herramienta invaluable para ingenieros y diseñadores que buscan alcanzar nuevos niveles de innovación y eficacia en los proyectos. En su esencia va más allá de los enfoques convencionales de diseño, desafiando las nociones tradicionales sobre cómo se conciben y construyen componentes y sistemas. Al emplear algoritmos de optimización, análisis de elementos finitos y simulaciones numéricas, los ingenieros y diseñadores pueden explorar una variedad de configuraciones y geometrías, identificando aquellas que ofrecen un rendimiento superior.

La OT aplicada en la pluma y el brazo de excavadoras es una innovación que desea transformar la industria de la construcción y la maquinaria pesada. La búsqueda constante de eficiencia y rendimiento ha llevado a explorar estas nuevas vías para mejorar la estructura y funcionalidad de estas partes cruciales de las excavadoras. La OT, se utilizará como una herramienta para lograr un diseño más eficiente y ligero, manteniendo al mismo tiempo la robustez y resistencia necesarias para el funcionamiento seguro de la excavadora. Al aprovechar los algoritmos avanzados y simulaciones numéricas, pudiendo rediseñar la forma y la distribución del material en la pluma y el brazo de la excavadora, optimizando así su rendimiento y minimizando el consumo de recursos.

Explorando la OT en la industria de excavadoras, destacaremos sus ventajas y desafíos. Analizando cómo esta técnica ha permitido la creación de equipos más eficientes y económicos, al tiempo que contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el desperdicio de material. Además, se detallará un ejemplo concreto sobre la excavadora mejorada gracias a la OT, demostrando su impacto real en la construcción y la ingeniería, destacando sus beneficios fundamentales y sus aplicaciones prácticas. Exploraremos cómo esta técnica está impulsando la creación de excavadoras más eficientes y sostenibles.

La OT implementando la manufactura aditiva, generan tecnologías en el ámbito de la ingeniería y la fabricación, están cambiando la forma en que concebimos y construimos la pluma y el brazo de las excavadoras a escala para poder representar un enfoque revolucionario que tiene el potencial de complementar la industria de la maquinaria pesada.

Como se verá más adelante en la evolución del diseño de las excavadoras a lo largo de la historia ha sido marcada por dos transformaciones significativas que han impulsado el progreso en la industria de la maquinaria de construcción. Desde sus comienzos como excavadoras de vapor con sistemas de poleas, transportadas por las vías férreas, hasta la era actual de las avanzadas excavadoras hidráulicas, este proceso de cambio ha sido excepcionalmente drástico y revelador.

Las excavadoras hidráulicas, al integrar sistemas hidráulicos para controlar sus movimientos, han llevado la eficiencia y versatilidad en las operaciones de excavación a niveles sin precedentes. Esta transición ha permitido que estas máquinas adquirieran movimientos autónomos mediante la adopción de ruedas u orugas, ofreciendo una movilidad mejorada en una variedad de terrenos e incluso adaptándose para aplicaciones náuticas en barcos.

A pesar de estas transformaciones tecnológicas notables, el principio estructural fundamental relacionado con las plumas y brazos ha perdurado a lo largo de los años desde la invención de las excavadoras. Esta estructura esencial proporciona la capacidad de levantar, cavar y manipular materiales de manera efectiva, destacando la robustez y eficacia de este componente clave en las modernas excavadoras. Bajo la estela de la innovación y cambio que este trabajo se propone explorar y ofrecer una alternativa a los diseños convencionales de la pluma y brazo de las excavadoras, buscando contribuir a la evolución continua de esta pieza fundamental en la maquinaria de construcción.

Con un enfoque en la implementación a través de la manufactura aditiva. Exploraremos cómo estas tecnologías trabajan en conjunto para crear diseños de excavadoras a escala más ligeros, resistentes y eficientes, al mismo tiempo que se reducen los costos de producción. Además, de que examinamos de ejemplos concretos abriendo nuevas posibilidades en el análisis de maquinaria pesada, promoviendo la sostenibilidad y la innovación en esta industria fundamental.

VI. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector de la construcción, minería y otras industrias que dependen de maquinaria pesada, las excavadoras desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones. Sin embargo, uno de los problemas clave que enfrentan las empresas de logística y transporte de maquinaria pesada, así como las empresas que utilizan o alquilan excavadoras, radica en el peso de las plumas y brazos de estas máquinas. Estos componentes, esenciales para el funcionamiento de las excavadoras, son extremadamente pesados debido a las demandas de carga y trabajo a las que se someten.

Empresas como “*Heav&Haulers*” encargadas a la logística y transporte de maquinaria pesada, redacta en su página de internet que “*Al enviar una excavadora a un sitio nuevo, el tiempo significa dinero, por lo que mientras más pronto tenga su excavadora, más pronto podrás trabajar*”, y agilizar este proceso reduciendo su peso facilitara la movilidad de este tipo de maquinaria.[1]

Al igual que empresas como “*JohnDeere*”, empresa distribuidora de carácter mundial en maquinaria pesada, nos explica que las excavadoras se clasifican por su peso, ya que su capacidad de excavación está en función del peso de este y de sus componentes, por lo que, manteniendo sus capacidades en los contrapesos y disminuyendo su peso en este tipo de componentes, podrá incrementar sus capacidades reduciendo el peso de la máquina, además de otras ventajas que aportan la OT. [2]

Los problemas se presentan de la siguiente manera:

1. Desgaste estructural y fatiga en los materiales:

El peso excesivo de las plumas y brazos de las excavadoras provoca un desgaste prematuro y fatiga en estos componentes. La continua exposición a cargas pesadas y movimientos repetitivos genera tensiones acumulativas que debilitan gradualmente la integridad de estos elementos cruciales. Como resultado, las plumas y brazos pueden desarrollar fisuras, grietas y deformaciones a lo largo del tiempo, lo que pone en peligro su capacidad para soportar cargas y realizar sus funciones de manera segura.

Este desgaste estructural no solo afecta la vida útil de las plumas y brazos, sino que también aumenta el riesgo de fallas catastróficas durante la operación de la excavadora. Estas fallas pueden ocurrir de manera repentina y sin previo aviso, lo que pone en grave riesgo la seguridad de los operadores, otros trabajadores en el sitio y la inversión en la maquinaria misma. Además, las consecuencias de tales fallas pueden incluir costosos tiempos de inactividad, reparaciones costosas y posiblemente incluso lesiones graves o fatales. Por lo tanto, es esencial abordar este problema de desgaste y fatiga estructural de las plumas y brazos de las excavadoras de manera efectiva para garantizar la seguridad y la eficiencia en la industria de la maquinaria pesada.

2. Costos de logística elevados:

Debido al peso excesivo de las plumas y brazos de las excavadoras, el transporte de estas máquinas se convierte en un desafío logístico considerable. La necesidad de utilizar vehículos de transporte especializados y obtener permisos específicos para el traslado agrega una capa adicional de complejidad a la operación. Esto no solo implica un proceso burocrático más largo, sino que también conlleva costos adicionales significativos en logística y transporte.

Los vehículos de transporte especializados destinados a llevar excavadoras pesadas son costosos de mantener y operar. Además, su disponibilidad puede ser limitada, lo que puede causar retrasos en la programación de proyectos, lo que a su vez resulta en una pérdida de tiempo y recursos. Los permisos especiales requeridos para el transporte de cargas pesadas implican costos adicionales, así como la necesidad de cumplir con regulaciones específicas que varían según la ubicación geográfica.

Estos altos costos de logística no solo aumentan el presupuesto de transporte de maquinaria pesada, sino que también pueden impactar negativamente en la rentabilidad de los proyectos en los que se utilizan las excavadoras. Por lo tanto, la reducción del peso de las plumas y brazos de estas máquinas es esencial para mitigar estos costos elevados y mejorar la eficiencia en la industria de la construcción y la maquinaria pesada.

3. Ineficiencia operativa:

El peso excesivo de las plumas y brazos también tiene un impacto negativo en la eficiencia operativa de las excavadoras. Este problema se manifiesta en varias formas, afectando tanto el rendimiento de la máquina como los gastos operativos asociados.

- Mayor consumo de combustible:

Las excavadoras con plumas y brazos más pesados requieren una cantidad significativamente mayor de energía para funcionar. Esto se traduce en un mayor consumo de combustible, lo que eleva los costos operativos. Además, el aumento en el consumo de combustible también tiene implicaciones ambientales, contribuyendo a una huella de carbono más grande y potencialmente incumpliendo regulaciones ambientales.

- Mayores requerimientos de mantenimiento:

La operación continua de excavadoras con componentes pesados aumenta el desgaste en otros sistemas y componentes de la máquina, como el motor, la transmisión y los sistemas hidráulicos. Esto conlleva una mayor necesidad de mantenimiento y reparaciones, lo que implica costos adicionales y tiempo de inactividad no planificado.

- Desgaste prematuro de componentes:

El peso excesivo ejerce tensiones adicionales en los componentes de la excavadora, lo que puede llevar a un desgaste prematuro y reducir la vida útil general de la máquina.

Estas ineficiencias no solo aumentan los costos operativos y de mantenimiento de las excavadoras, sino que también disminuyen la productividad general en el sitio de trabajo. Por lo tanto, la OT de las plumas y brazos de las excavadoras para reducir su peso se convierte en una medida esencial para mejorar la eficiencia y rentabilidad en la industria de la maquinaria pesada.

VII. JUSTIFICACIÓN

Se desea mejorar el rendimiento y eficiencia de las plumas y brazos de las excavadoras pues son componentes críticos que deben soportar cargas y condiciones operativas extremas, La optimización topológica permitirá crear geometrías más eficientes que maximizan la relación resistencia-peso, mejorando el rendimiento general de las excavadoras y reduciendo el consumo de energía.

La empresa “*BLOOM & BUCKET*” estima que el peso promedio una excavadora es de 6.8 toneladas y esto puede aumentar dependiendo de los accesorios o implementos que se suelen instalar a las excavadoras acorde al tipo de trabajo que realizara. Las aplicaciones de las excavadoras pueden ser en proyectos de agricultura, jardinería, construcción, demolición y es gracias a su versatilidad que se deben conocer su peso para tenerlo en cuenta en circunstancias como el remolque, elevaciones por grúas y traslado de la maquinaria, además de los factores previamente mencionados. [3]

La OT, mediante la simulación numérica es una estrategia clave para mejorar el rendimiento, reducir costos, promover la sostenibilidad y garantizar la competitividad en la industria de la construcción. Este enfoque es fundamental para abordar los desafíos actuales y futuros en la maquinaria pesada y la construcción de manera eficiente y responsable.

Se propone la optimización de las plumas y brazos de las excavadoras a través de la optimización topológica y el diseño estructural. Esto permitirá:

1. Reducción de peso:

Al optimizar la forma y la distribución de material en las plumas y brazos, se puede reducir su peso sin comprometer su resistencia y rendimiento. Esta reducción de peso tiene múltiples beneficios, entre los que se incluyen:

- **Facilitación de transporte:** Las plumas y brazos más ligeros permiten un transporte más sencillo y rentable de las excavadoras. Se reducen los costos asociados con vehículos de transporte especializados y permisos adicionales, lo que agiliza el proceso logístico y disminuye los tiempos de espera.
- **Menor consumo de combustible:** Con un peso reducido en las plumas y brazos, las excavadoras requieren menos energía para funcionar. Esto se traduce en un menor consumo de

combustible, lo que disminuye los gastos operativos y contribuye a una huella ambiental más baja.

- Menor desgaste en componentes: La reducción de peso alivia la tensión en otros componentes de la excavadora, lo que resulta en un desgaste más lento y una mayor vida útil de la maquinaria.

2. Mejora de la eficiencia estructural:

La configuración óptima de estos componentes tiene un impacto significativo en la eficiencia estructural de las excavadoras. Al mejorar su rigidez y capacidad de carga, se obtienen los siguientes beneficios:

- Mayor capacidad de carga: Las plumas y brazos optimizados pueden soportar cargas más pesadas de manera segura. Esto permite que la excavadora levante objetos más grandes o realice excavaciones más profundas, lo que aumenta su versatilidad y su capacidad para enfrentar una variedad de tareas.
- Eficiencia en la excavación: La mejora en la rigidez y la resistencia de las plumas y brazos se traduce en una excavación más eficiente. La máquina puede realizar movimientos precisos y potentes, lo que acelera el progreso en el sitio de trabajo y reduce el tiempo necesario para completar proyectos.
- Mayor Seguridad: Una configuración estructural óptima también contribuye a una mayor seguridad en el lugar de trabajo, ya que reduce el riesgo de fallas y accidentes debido a la fatiga del material o la sobrecarga.

La combinación de la reducción de peso y la mejora de la eficiencia estructural en las plumas y brazos de las excavadoras resulta en máquinas más versátiles, eficientes y seguras, lo que a su vez beneficia a la industria de la maquinaria pesada en términos de costos, productividad y sostenibilidad.

3. Reducción de costos de fabricación:

Utilizar menos material y mejorar el diseño de las plumas y brazos no solo tiene un impacto positivo en el rendimiento de las excavadoras, sino que también conlleva ventajas en términos de costos de fabricación y, en última instancia, el costo total de las excavadoras.

- El ahorro de material permite eliminar el exceso de material innecesario en las plumas y brazos de las excavadoras. Esto conduce a una reducción en la cantidad de material requerido para su fabricación, lo que ahorra costos en materia prima.
- El proceso de fabricación y la simplificación del diseño y la reducción de material pueden simplificar los procesos de fabricación. Esto se traduce en una mayor eficiencia en la producción, menor tiempo de fabricación y, en última instancia, una disminución de los costos de mano de obra y operación de maquinaria.
- La reducción de los costos de fabricación se traduce en un costo total más bajo para las excavadoras, lo que puede beneficiar tanto a los fabricantes como a los clientes. Esto hace que las excavadoras sean más accesibles y asequibles para las empresas que las adquieren, al tiempo que mejora la rentabilidad de los fabricantes en un mercado altamente competitivo.

El proyecto permitirá desarrollar habilidades en simulación numérica, diseño para manufactura aditiva y optimización topológica. Además, generará conocimiento valioso sobre la aplicación de estas técnicas en el sector de la maquinaria pesada y con los resultados obtenidos en las excavadoras a escala pueden sentar las bases para la optimización topológica de componentes en excavadoras de tamaño real y en otros equipos y maquinaria pesada.

VIII. OBJETIVOS

Objetivo general

Aplicar técnicas de optimización topológica para el ajuste de distribución de material en las geometrías de las plumas y brazos de excavadoras mediante simulación numérica con el fin de encontrar configuraciones que maximicen la eficiencia estructural.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio sobre las estructuras de la pluma y bazo en excavadoras, identificando las áreas y puntos críticos de carga y las características de diseño actuales, recopilando datos y especificaciones técnicas de las excavadoras de referencia, incluyendo materiales utilizados, cargas operativas, y restricciones de diseño.
- Desarrollar mediante simulación numérica las configuraciones geométricas iniciales de la pluma y el brazo generando los algoritmos de optimización topológica que se ajusten a la distribución del material en los componentes para reducir el peso manteniendo los criterios de rendimiento y resistencia.
- Realizar iteraciones de simulación y optimización para ajustar y refinar gradualmente las geometrías, a través de simulaciones garantizar que cumplan con los requisitos de resistencia y rigidez bajo diferentes condiciones de carga.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

En la década de 1960 *Schmidt Technology* introdujo una idea revolucionaria que dio origen a una nueva disciplina; diseñar objetos o sistemas de costo mínimo que, durante su vida útil, deben resistir las máximas sollicitaciones. Esto llevó a abordar los problemas de diseño en términos de minimización con restricciones, utilizando técnicas de programación no lineal y computadoras de alta velocidad.

Eventualmente, la optimización de formas y dimensiones en ingeniería estructural se centraba en minimizar el peso con restricciones no lineales para limitar los desplazamientos y tensiones. Sin embargo, desde que *Bendsøe* y *Kikuchi* desarrollaron conceptos básicos en 1988, donde los problemas de optimización topológica se han planteado buscando maximizar la rigidez. Este enfoque busca distribuir el material en una pieza de manera que se maximice la rigidez y se minimice la energía de deformación para una carga específica, evitando restricciones complicadas. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones, como la incapacidad de considerar múltiples estados de carga y la posibilidad de soluciones inestables al refinar la discretización.[4]

La historia de la excavadora comenzó en 1796 con la invención de la excavadora a vapor. Sin embargo, la primera excavadora patentada con una pluma mecánica, conocida como la excavadora a vapor Otis, no apareció hasta 1839, puesto que, en 1835, *William Otis* trabajó en la patente de la "Grúa-excavadora para excavación y movimiento de tierra", después de varios intentos fallidos a lo largo de cuatro años. Esta máquina contribuyó al desarrollo de la industria minera y de construcción. Hasta finales del siglo XIX, las excavadoras se desplazaban por cadenas o cables. En 1897, la empresa *Kilgore Machine Co.* registró una patente de excavadora a vapor controlada por un sistema hidráulico.

En la década de 1920, los fabricantes comenzaron a producir excavadoras modernas montadas sobre cadenas o ruedas y funcionando a gas, lo que aumentó su movilidad. La Bucyrus 120-B, comercializada en 1925, fue la primera excavadora que pudo girar 360 grados. Durante la Segunda Guerra Mundial, la demanda de maquinaria de obra aumentó, y las excavadoras se utilizaron tanto para cavar trincheras como para la reconstrucción después de la guerra. [5],[6]

1.2 Topología

La topología de una superficie es una abstracción matemática del concepto familiar de alguna superficie hecha de un material cualquiera. Es una variedad de dimensión del espacio topológico con las mismas propiedades que el plano familiar en la *Geometría euclídea*. Para dimensiones superiores el equivalente natural de una superficie es una variedad *n-dimensional*, en el espacio topológico con las mismas propiedades locales que un espacio euclídeo *n-dimensional*.

En otras palabras, se trata de una especialización vinculada a las propiedades y características que poseen los cuerpos geométricos y que se mantienen sin alteraciones gracias a cambios continuos, con independencia de su tamaño o apariencia.

Un espacio euclidiano, también conocido como espacio euclidiano *n-dimensional*, es un concepto fundamental en la geometría y el análisis matemático. Este tipo de espacio lleva el nombre del matemático griego Euclides y proporciona la base para la geometría euclidiana clásica. La definición formal de un espacio euclidiano es la siguiente:

Dado un número real n , un espacio euclidiano *n-dimensional*, denotado como \mathbb{R}^n , es un conjunto de *n-tuplas* de números reales. Cada *n-tupla* (x_1, x_2, \dots, x_n) en \mathbb{R}^n representa un punto en el espacio. Los números x_1, x_2, \dots, x_n son las coordenadas del punto en las *n-dimensiones*.

Los espacios euclidianos son esenciales en el estudio de la geometría, el análisis matemático y muchas otras ramas de las matemáticas y la física. La noción de distancia euclidiana y el producto escalar proporcionan herramientas fundamentales para medir distancias, ángulos y realizar cálculos geométricos en un espacio *n-dimensional*. [7]

1.2.1 Tipos de optimización

En la ingeniería, la configuración de una pieza o sistema se convierte en un objetivo fundamental para potenciar las características cruciales que inciden en su rendimiento final. En el contexto de las optimizaciones estructurales, la búsqueda de la solución óptima implica la aplicación de diversas técnicas, que abarcan desde enfoques eminentemente empíricos hasta métodos matemáticos analíticos y numéricos.

Estas técnicas pueden clasificarse en tres categorías principales: optimización paramétrica, optimización de forma y optimización topológica, las cuales se pueden ver en la figura 1.

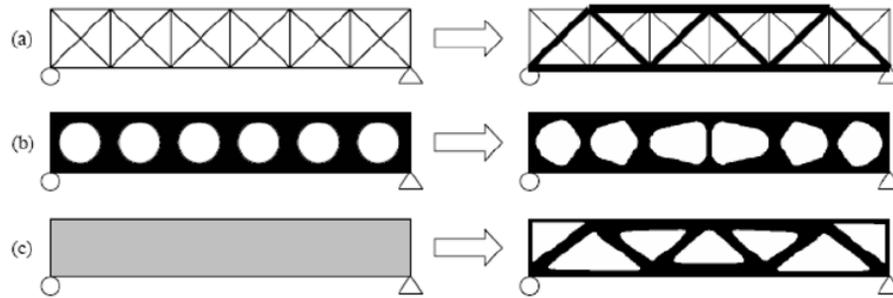


Figura 1 Categorías de optimización estructural:

a) Optimización paramétrica

b) Optimización de forma

c) Optimización topológica.

La optimización topológica, explora los cambios fundamentales en la distribución material dentro de la estructura. La disposición más eficiente y estratégica de los elementos estructurales, eliminando aquellas áreas que no contribuyen significativamente al rendimiento global, lo que resulta en diseños más livianos y eficientes.

1.2.1.1 Optimización paramétrica

La optimización paramétrica es un enfoque fundamental que implica la discretización de una estructura predefinida mediante elementos de trama (o cercha) con el objetivo de determinar las dimensiones óptimas de la misma. Este proceso permite ajustar variables de diseño cruciales, tales como el área transversal en cada elemento, longitudes, espesores y radios de detalle. La capacidad para modificar estas variables estratégicas ofrece flexibilidad en la adaptación de la estructura a requisitos específicos de rendimiento, resistencia y eficiencia. [8]

La clave de la optimización paramétrica radica en la exploración sistemática de múltiples combinaciones de valores para las variables ajustables, utilizando métodos matemáticos y algoritmos especializados. Este enfoque no solo busca maximizar o minimizar determinadas características de la estructura, sino que también permite evaluar cómo las variaciones en los parámetros de diseño afectan el desempeño global de las piezas.

1.2.1.2 Optimización de forma

La optimización de forma es una metodología especializada que se enfoca en descubrir la configuración más eficiente de un dominio estructural sin alterar su topología fundamental, es decir, sin introducir huecos o cavidades en su interior. En este enfoque, se lleva a cabo la parametrización de los contornos internos y externos de la estructura mediante curvas splines o NURBS (Superficies B-Splines No Uniformes), permitiendo así un control preciso sobre la geometría del diseño.

El empleo de curvas splines o NURBS proporciona una flexibilidad significativa en la representación de las formas, permitiendo la creación de diseños fluidos y aerodinámicos. Además, la optimización de forma se destaca por su capacidad para abordar desafíos específicos de diseño, permitiendo adaptar la estructura de manera precisa a los requisitos funcionales y estéticos. Este enfoque se escoge como una herramienta valiosa en el campo de la ingeniería, impulsando la creación de estructuras que no solo cumplen con los criterios técnicos, sino que también exhiben una eficiencia geométrica excepcional.

1.2.1.3 Optimización topológica

La optimización topológica, donde el objetivo es distribuirse el material en el dominio para encontrar la estructura. En este problema se introducen huecos o cavidades que en el inicio no estaban. Inicialmente solo se dispone de la información de las condiciones de carga y las restricciones para el dominio inicial donde se desarrolla la estructura, como se menciona a continuación.

1.3 Optimización Topológica

La Optimización Topológica (OT) es una herramienta matemática que permite a los diseñadores sintetizar topologías óptimas en ingeniería. La OT representa un área de investigación en constante expansión, interconectando disciplinas como las matemáticas, la mecánica y las ciencias computacionales. Este campo, impulsado por un crecimiento acelerado, no solo se destaca por su relevancia teórica, sino que también presenta aplicaciones prácticas de gran envergadura en la industria y el sector de manufactura. Dicho de otra manera, se

refiere a una pieza mecánica diseñada para maximizar o minimizar ciertas características deseadas, como la reducción de peso en el diseño de alas de avión mientras se garantiza rigidez y resistencia adecuadas. [9]

La optimización busca encontrar diseños óptimos que cumplan con restricciones, como desplazamiento máximo y esfuerzo permitido por el material. Se utilizan métodos analíticos, numéricos y empíricos, y la OT es uno de los métodos numéricos más utilizados, ya que permite introducir o quitar material, generar agujeros y lograr una amplia variedad de geometrías.[10]

En la actualidad, la Optimización Topológica se ha convertido en una herramienta indispensable en diversas industrias, incluyendo la aeroespacial, automotriz y de obras civiles. Su capacidad para mejorar la eficiencia estructural, reducir el peso y optimizar el uso de materiales la hace especialmente valiosa en la concepción y desarrollo de componentes cruciales en estas áreas.

Asimismo, la Optimización Topológica desempeña un papel fundamental en el ámbito de las micro y nanotecnologías, especialmente en el diseño de mecanismos flexibles. Su capacidad para adaptarse a escalas diminutas y su enfoque en encontrar las configuraciones geométricas más eficientes resultan fundamentales para la creación de dispositivos microscópicos altamente funcionales.

La OT tiene un papel esencial en la ingeniería moderna al ayudar a reducir costos y mejorar la eficiencia en una variedad de aplicaciones. Los métodos de OT involucran técnicas de elementos finitos y optimización multivariable y no lineal. Además, se pueden utilizar algoritmos para sintetizar estructuras óptimas y realizar procesos de rediseño mediante impresión 3D. [11]

Los métodos de homogeneización se presentan como una herramienta común para la optimización topológica, caracterizando la topología a través de la densidad y asignando regiones de densidad nula a los huecos. En ocasiones, se requieren métodos de penalización o filtros para obtener resultados ingenierilmente útiles. La OT dispone la posibilidad de desarrollar algoritmos para generar estructuras óptimas y analizar el impacto de los parámetros de cálculo clave, incluso con aplicaciones de impresión 3D para el rediseño de piezas mecánicas.

La OT emerge como una disciplina interdisciplinaria con un impacto significativo en diversas ramas industriales y tecnológicas. Su versatilidad y capacidad para abordar desafíos

específicos la consolidan como un campo de investigación esencial, impulsando la innovación y la eficiencia en la ingeniería y la fabricación modernas.

1.3.1 Optimización topológica en componentes estructurales mecánicos

El método de la OT fue empleado en la reconfiguración de una pieza mecánica con el objetivo de minimizar su peso. Se abordó el componente de unión de la figura 2, diseñado para soportar una carga vertical de 5,340 N, aplicada en el agujero inferior y distribuida en los dos agujeros superiores. El material seleccionado para este componente fue “acero estructural A36”, con un espesor de 10 mm y un límite de fluencia típico de 250 MPa.

Para llevar a cabo este proceso, se utilizó el software SolidWorks para crear un modelo CAD detallado del componente mecánico. Este modelo permitió realizar cálculos precisos del volumen ocupado por la pieza. Al tener la densidad del “acero estructural A36” conocida, se pudo derivar el peso del componente mecánico, que resultó ser de 590.5 gramos.

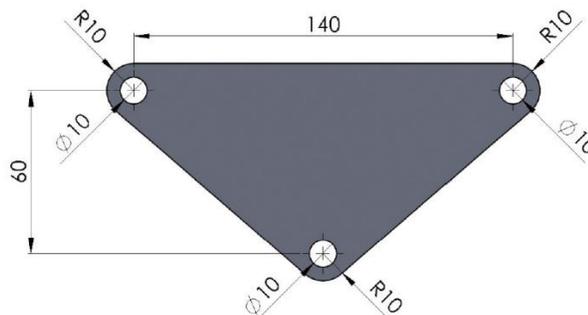


Figura 2 Componente mecánico analizado

Para implementar el método de la OT en el componente mecánico, se definió un dominio rectangular, figura 3, en el cual cada milímetro se traduce a un elemento finito (EF). Esto implica una discretización de 160×80 EF, dando como resultado un total de 12,800 EF y 26,082 grados de libertad. Se empleó un factor de penalidad $p=3$, una elección respaldada por la literatura, y se estableció que el volumen final de la estructura sería el 40 % del volumen inicial ($V=0.4$).

El dominio incluye tres zonas no optimizables, cada una con un radio de 10 mm y un agujero interior de 5 mm. En cada iteración del proceso, las zonas no optimizables se fijaron asignando valores de $\rho = \rho_{min}$ a los agujeros y $\rho=1$ a las áreas con material. Esta asignación garantizó

que los agujeros conservaran su forma y tamaño mientras el algoritmo optimizaba el resto del componente.

La figura 3 proporciona un esquema visual del dominio, ilustrando las zonas optimizables y no optimizables, así como la distribución de la carga en la estructura. Este enfoque detallado del dominio proporciona una base sólida para el proceso de optimización topológica, asegurando resultados precisos y relevantes para la mejora del componente mecánico.

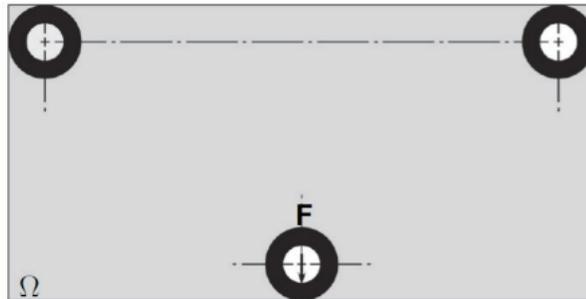


Figura 3 Dominio de cálculo

La OT resultante se visualiza en la figura 4. No obstante, la estructura derivada presenta bordes difusos, requiriendo un proceso de interpretación antes de su aplicación en un convencional diseño mecánico. Para llevar a cabo la interpretación del componente mecánico, Este procedimiento implica la generación de un gráfico vectorizado figura 5, del componente, alineado con el gráfico en mapa de bits obtenido mediante OT.

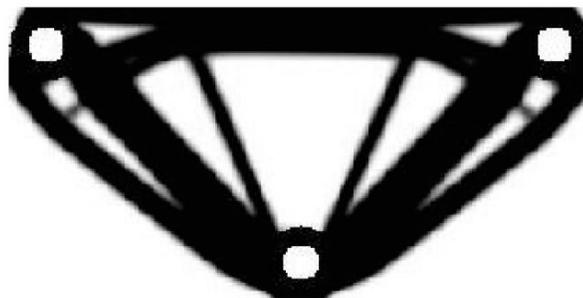


Figura 4 Estructura generada por optimización topológica

A partir del gráfico vectorizado, se crea un modelo CAD sólido que permite recalcular el volumen y realizar un análisis de resistencia mediante EF. El componente mecánico rediseñado presenta un peso final de *447.9 gramos*. La discrepancia de peso entre el

componente original y el que fue sometido al proceso de la OT asciende a *142.6 gramos*, reflejando así una notable reducción del *24.1%* en el peso total.

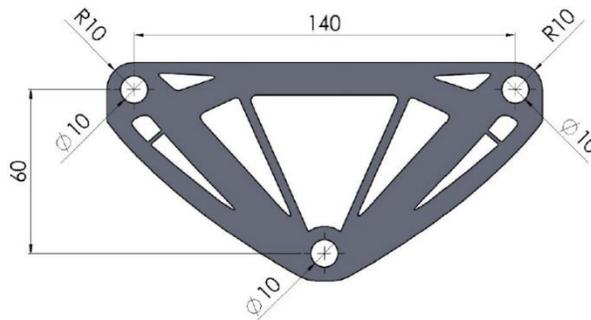


Figura 5 Interpretación del componente mecánico

En el análisis de esfuerzos por EF con Ansys para verificar la capacidad de ambos componentes ante la carga. En la figura 6 muestra la distribución del esfuerzo para el componente original/ robusto y el diseñado por OT, respectivamente. Para el componente original, el esfuerzo máximo equivalente fue de 81.2 MPa. En cambio, el componente rediseñado por OT exhibió un esfuerzo máximo de 95.1 MPa, ligeramente mayor.



Figura 6 Esfuerzo del elemento mecánico

a) Original

b) Rediseñado optimizada.

1.3.2 Optimización topológica de una viga con cargas y punto fijo

A continuación, se muestra el ejemplo de análisis estructural de una placa de dimensiones *200x100 metros (m)*, apoyada en sus dos vértices inferiores y sometida a una fuerza

distribuida a lo largo del eje horizontal inferior, comúnmente conocido como el "*Problema del puente*". La figura 7 ilustra un diagrama del problema inicial, seguido de varios pasos intermedios y el resultado final del análisis.

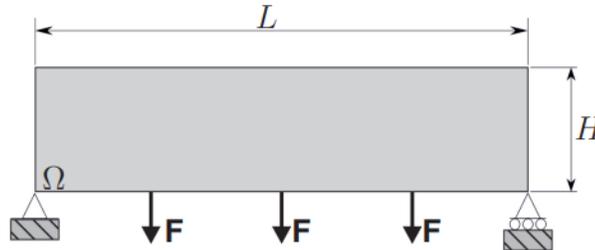


Figura 7 Representación del puente

El proceso se llevó a cabo con una programación de 20,000 EF. Gracias a eso se permite obtener resultados detallados y precisos en la evaluación de la respuesta estructural de la placa, recreando las mismas configuraciones de la simulación anteriores, revelando las variaciones y ajustes realizados durante las iteraciones del análisis.

La pieza optimizada, figura 8, se observa una eliminación inicial de las esquinas superiores de la placa, ya que son áreas con menor tensión al ser salientes descargados. A medida que la geometría adquiere una forma redondeada en estas esquinas, se introduce un agujero central en la placa, que se expande a lo largo de las iteraciones hasta que el algoritmo identifica nuevas ubicaciones para perforar. Con el tiempo, se desarrolla una estructura coherente que consiste en un semi anillo conectado a la base mediante tirantes, los cuales sustentan el "peso" de la estructura.

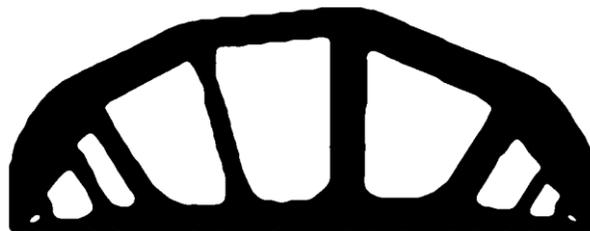


Figura 8 Pieza optimizada del puente

1.4 Simulación numérica

La simulación numérica es una herramienta integral que utiliza herramientas matemáticas para modelar, simular y predecir el comportamiento de dispositivos, productos, procesos en ingeniería y ciencias aplicadas. Se destaca su aplicación en fenómenos mecánicos, térmicos, acústicos, fluido-estructurales, electrónicos, químicos, medioambientales y financieros. En el ámbito diseño asistido por computadora e ingeniería asistida por computadora (CAD/CAE), los grupos de investigación desarrollan soluciones que abarcan desde la modelización matemática hasta la creación de paquetes de software.[12]

Dado su carácter transversal, las aplicaciones son diversas, incluyendo el diseño y cálculo de resistencia de estructuras, solidificación de aleaciones, predicción de calidad del agua, optimizaciones y valoración de productos. En ingeniería, la simulación numérica investiga propiedades como deformaciones, esfuerzos, distribuciones de velocidad y temperatura, siendo esencial para el rediseño y mejora de productos y procesos, con beneficios como eficiencia, seguridad, vida útil, reducción de contaminantes y costos. [13]

En el entorno industrial, la comprensión general de procesos basada en experiencia a menudo se ve limitada. En este trabajo, los métodos numéricos destacan al ofrecer una comprensión más precisa y eficiente, especialmente cuando se enfrentan problemas bajo condiciones específicas y restringidas. Como mención; la diferencia entre simuladores y emuladores: los primeros imitan el comportamiento básico de un sistema, mientras que los segundos replican exactamente otro sistema, cumpliendo todas sus reglas, pero operan en un entorno diferente.

1.4.1 Simulación de maquinaria industrial

Los fabricantes de maquinaria industrial crean algunos de los productos más complejos del mundo en unas condiciones de mercado muy competitivas. Los productos son especializados, con requisitos de diseño y producción exigentes. Los fabricantes se enfrentan al reto de crear productos que cumplan los diversos requisitos de rendimiento y seguridad de los clientes, mejorando a la vez los tiempos de ciclo y reduciendo los costes. [14]

Las simulaciones realistas que cumplen una multitud de retos de ingeniería para fabricantes de maquinaria industrial. Proporcionamos herramientas de análisis fáciles de usar que permiten a los diseñadores tomar decisiones sobre el diseño. Las múltiples herramientas para automatizar el rendimiento de los estudios de exploración de diseño y la optimización del diseño. Esta amplia cartera de software permite a los desarrolladores de maquinaria industrial sacar partido de la herramienta de simulación que se adecue a su aplicación específica. Además, facilita la colaboración entre diseñadores y analistas expertos para acelerar la toma de decisiones de diseño, gracias a los datos de rendimiento, y reducir la necesidad de realizar pruebas físicas costosas. Nuestras soluciones de análisis de diseño le permiten predecir de forma precisa el complejo comportamiento real de las piezas de componentes, las estructuras a gran escala y los sistemas completos.

1.4.2 Ingeniería estructural de maquinaria pesada

El equipo móvil pesado debe operar durante décadas, enfrentando largas jornadas de trabajo y cargas intensas. Es crucial que este equipo esté diseñado para resistir el paso del tiempo, minimizando así los períodos de inactividad del servicio que podrían tener consecuencias significativas. Además, los desafíos en el desarrollo y gestión de carteras de productos duraderos se incrementan debido a las demandas de personalización por parte de los clientes, lo que genera una amplia variedad de variantes de productos.

La solución de ingeniería estructural para maquinaria pesada ofrece una respuesta integral en términos de estructuras y durabilidad. Optimizando el proceso de simulación, evalúa las fallas del producto y reduce los costos de garantía tanto para componentes individuales como para grandes ensamblajes, incluyendo estructuras soldadas. Este enfoque puede ser empleado tanto por diseñadores, para identificar problemas potenciales en las primeras etapas del ciclo de diseño, como por analistas, para realizar simulaciones detalladas.

La solución facilita el seguimiento exhaustivo de los requisitos del proyecto desde la ideación hasta el lanzamiento del producto. Al proporcionar una única fuente de representaciones precisas de diseño y simulaciones, se evitan confusiones costosas entre los equipos, reduciendo así los retrasos subsiguientes. Los cambios en los diseños se propagan sin complicaciones, eliminando la necesidad de reconstruir modelos de simulación, como en la actualización de superficies

medias o líneas de soldadura. Esta solución capacita a los diseñadores para realizar simulaciones y detectar posibles problemas en las primeras etapas del ciclo de diseño. Complementado con avanzados solucionadores multifísico y herramientas de exploración de diseño, los ingenieros pueden llegar a un diseño óptimo de manera eficiente, disminuyendo los tiempos de comercialización y los costos asociados al desarrollo y mantenimiento del producto.

1.4.3 Ingeniería estructural de equipos.

Con el creciente incremento en la demanda de productos manufacturados y la masiva urbanización global, el Equipo Industrial se encuentra en el epicentro de nuestra transformación a nivel mundial. Para satisfacer esta creciente demanda, es esencial que los productos y los procesos de fabricación sean robustos para minimizar los tiempos de inactividad y los costos asociados. La mayor confiabilidad resulta en una disminución de los costos de mantenimiento y genera ahorros significativos para las empresas de equipos industriales.

La capacitación de los ingenieros es clave para diseñar equipos con una vida útil extendida que cumpla con los requisitos de rendimiento, operativos y de fabricación. Esto se logra en un entorno colaborativo donde la innovación florece mediante procesos integrados desde el principio hasta el final. El objetivo es maximizar la vida y el rendimiento de los equipos industriales fabricados. A través de las soluciones del proceso industrial de ingeniería estructural de equipos, garantizamos que sus productos fabricados operen de manera efectiva en entornos exigentes y puedan resistir la prueba del tiempo.

1.4.4 Geometría de triángulos en las estructuras

El triángulo, son una figura geométrica con tres lados y tres ángulos, posee propiedades únicas que lo convierten en un elemento fundamental para lograr estructuras robustas y estables en el ámbito de la ingeniería y la arquitectura. Su estabilidad inherente se deriva de varias características geométricas y principios físicos que impactan positivamente en el rendimiento estructural [15].

La disposición triangular de sus elementos proporciona una distribución eficiente de las fuerzas aplicadas. Cuando una carga externa actúa sobre un triángulo, estas fuerzas se dividen y se transmiten a lo largo de sus lados de manera equitativa. Esta distribución uniforme

evita concentraciones de esfuerzos en áreas específicas, minimizando así el riesgo de deformación o fallo estructural. Comparado con formas geométricas más complejas, el triángulo ofrece una solidez intrínseca que contribuye a la integridad global de la estructura, como se puede ver en la figura 9.

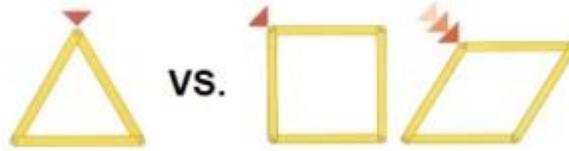


Figura 9 Ejemplo de deformación al aplicar fuerzas en triángulo y cuadrados

Además, la geometría triangular es especialmente efectiva en la transferencia de cargas. La disposición de los vértices y lados en un triángulo permite que las fuerzas aplicadas se disipen a lo largo de sus miembros de manera eficiente. Esta característica es esencial en la ingeniería de puentes, edificios, maquinaria pesada como con las excavadoras, donde la capacidad de transferir y distribuir cargas de manera equitativa es esencial para garantizar la estabilidad a largo plazo.

1.5 Industria 4.0

La industria manufacturera está experimentando un cambio significativo mediante la adopción de tecnologías emergentes, marcando así el inicio de la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0. En este enfoque se busca transformar las fábricas en entornos inteligentes, donde las máquinas se comunican y aprenden entre sí, reduciendo la intervención humana en los procesos de producción. En países como México, se implementan estrategias para digitalizar las industrias y mantener la competitividad en el mercado global.

La Industria 4.0 en México, la importancia de la educación y capacitación en este contexto. Se han establecido centros de innovación y tecnología, rediseñado planes de estudio y proporcionada capacitación a la fuerza laboral. Además, se han implementado programas de colaboración con empresas para fomentar la innovación.

El objetivo central de la Industria 4.0 es facilitar la comunicación y cooperación entre industrias de todo el mundo, beneficiando tanto a productores como consumidores.

La importancia de tecnologías como redes inalámbricas, sensores, análisis de big data, Internet de las cosas (IoT), sistemas ciber físicos y servicios en la nube en la Industria 4.0. Se mencionan las cinco características principales de la Industria 4.0 según Lu: digitalización, optimización y personalización de la producción, automatización y adaptación, interacción humano-máquina, valor agregado a los servicios existentes, e intercambio automático de información.

Se concluye que el internet, tanto el IoT como el Internet de los servicios, es fundamental para el desarrollo de fábricas inteligentes en la Industria 4.0. Otras tecnologías habilitadoras incluyen sistemas ciber físicos, análisis de big data y servicios en la nube, que, a pesar de ser diferentes, están interrelacionadas en el funcionamiento de una fábrica inteligente. [16]

La integración de la manufactura 3D y la simulación numérica en la Industria 4.0 ofrece beneficios significativos. La manufactura 3D, permite la producción eficiente y personalizada, reduciendo costos y minimizando el desperdicio de materiales. Por otro lado, la simulación numérica posibilita pruebas virtuales de productos y procesos, acelerando el desarrollo y optimizando la eficiencia de fabricación. Estas tecnologías se conectan en la creación de Gemelos Digitales, representaciones virtuales que permiten el monitoreo en tiempo real del rendimiento de activos físicos.

La integración de manufactura 3D y simulación numérica en la cadena de suministro digital mejora la visibilidad y el control, facilitando la toma de decisiones informada. A pesar de sus beneficios, desafíos como la garantía de calidad y la certificación de productos deben ser abordados. La interoperabilidad entre sistemas y plataformas también es crucial para una implementación efectiva. Ejemplos de aplicaciones incluyen el prototipado rápido con impresión 3D y la optimización de procesos de fabricación mediante simulación numérica.

1.6 Principales tecnologías emergentes de la industria 4.0

El objetivo es lograr que todos los elementos de una fábrica manufacturera sean inteligentes, autónomos y capaces de reconfigurarse, tomando decisiones basadas en datos y requisitos del entorno. La Industria 4.0 se caracteriza por la búsqueda de convertir todos los elementos de una fábrica en entidades inteligentes y autónomas, capaces de adaptarse y tomar decisiones basadas en datos del entorno.

Las tecnologías habilitantes fundamentales incluyen las siguientes, aunque este trabajo se enfocara más en las áreas de manufactura inteligente y simulación numérica:

- **Sistemas ciber físicos (CPS):** Introducidos en 2006, los CPS combinan objetos físicos con algoritmos computacionales para mejorar el rendimiento de recursos físicos, como maquinaria y controladores. Son esenciales para la conectividad y el control en la Industria 4.0.
- **Internet de las cosas (IoT):** Esta red conecta objetos físicos a través de la internet, permitiendo la recopilación y transmisión de datos en tiempo real. En el contexto de la Industria 4.0, el IoT facilita la comunicación entre máquinas y la toma de decisiones autónoma.
- **Redes de sensores inalámbricos industriales (IWSNs):** Estas redes inalámbricas permiten la comunicación entre sensores distribuidos en un entorno industrial. Proporcionan datos en tiempo real sobre condiciones ambientales y de operación, facilitando la toma de decisiones basada en información actualizada.
- **Almacenamiento en la nube:** La nube proporciona un espacio virtual para almacenar y acceder a grandes cantidades de datos. En la Industria 4.0, facilita el almacenamiento y la gestión eficiente de datos generados por procesos de producción y sistemas ciber físicos.
- **Minería de datos:** Esta técnica implica analizar grandes conjuntos de datos para identificar patrones y tendencias significativas. En la Industria 4.0, la minería de datos ayuda a extraer información valiosa para mejorar la eficiencia y la toma de decisiones.

1.7 Manufactura inteligente

El concepto de Industria 4.0, originado en Alemania en 2011, se refiere a una política económica gubernamental centrada en estrategias de alta tecnología. Esta iniciativa se caracteriza por la automatización, digitalización de procesos y el empleo de tecnologías de la electrónica e información en la manufactura. También destaca por la personalización de la producción, la oferta de servicios y la creación de negocios de valor agregado, así como por las capacidades de interacción e intercambio de información entre humanos y máquinas.

La manufactura inteligente [17] se define como la capacidad de representar digitalmente todos los aspectos de la manufactura, desde el diseño hasta el proceso de fabricación. Se utiliza software como el de diseño y manufactura asistida por computadora (CAD/CAM), sistemas de gestión del ciclo de vida de los productos (PLM) y herramientas de análisis, simulación y gestión. Este enfoque de manufactura emplea métodos digitales para la planificación y validación de todas las etapas de fabricación, desde el desarrollo del producto hasta la planificación de la producción y las instalaciones. Se apoya en un conjunto de tecnologías que no solo facilitan la validación previa de productos y procesos, sino que también reducen los tiempos de desarrollo, los costos de fabricación y los lotes de manufactura. En resumen, la Manufactura Inteligente flexibiliza los procesos de fabricación, mejora la calidad del producto y acelera los tiempos de respuesta al mercado.

1.8 Softwares de optimización topológica

La OT es un método matemático y de software que distribuye material en un volumen específico según restricciones predefinidas. Esta técnica se utiliza en el diseño digital y, especialmente, en la fabricación aditiva para reducir el uso de material, mantener propiedades mecánicas y disminuir tanto el tiempo de fabricación como los costos asociados.[18]

Se mencionan varios softwares especializados en optimización topológica, destacando algunas características clave de cada uno:

- *3DXpert (3DSystems)*: Un software integral que optimiza el proceso de fabricación aditiva desde el diseño hasta el postprocesamiento, reduciendo la cantidad de material utilizado y mejorando la resistencia y la estructura de las piezas.
- *Altair Inspire (Altair Engineering)*: Integrando tecnologías como OptiStruct, ofrece herramientas de modelado 3D y optimización topológica que permiten visualizar, aplicar tensiones, simplificar geometrías, y más.
- *Ansys*: Una familia de productos que combina simulación física, simulación de alta realidad y modelado de geometría en una herramienta fácil de usar, con optimización topológica como una de sus características destacadas.
- *CogniCAD (Paramatters)*: Una plataforma en la nube que utiliza la optimización topológica para ayudar en la optimización de procesos desde el diseño hasta la fabricación, con características útiles como la generación automatizada de estructuras de soporte para impresión 3D.
- *Creo Generative Topology Optimization (PTC)*: Una extensión de Creo CAD que permite definir restricciones y requisitos del modelo 3D, considerando materiales y procesos de fabricación, mejorando la productividad y considerando requisitos específicos.
- *Netfabb (Autodesk)*: Centrado en la preparación del proceso productivo, Netfabb incluye la optimización topológica para mejorar el diseño para la fabricación aditiva y reducir fallos durante el proceso.
- *nTopology*: Un software que permite la creación de geometrías complejas mediante optimización topológica y diseño generativo, útil para resolver problemas avanzados de ingeniería y fabricación.

Estos softwares de optimización topológica buscan mejorar la eficiencia en la fabricación aditiva, reduciendo el uso de material, acelerando el proceso de diseño y optimizando el rendimiento de las piezas.

1.9 Excavadoras

Una excavadora es una máquina de construcción pesada diseñada principalmente para realizar tareas de excavación, movimiento de tierras y manipulación de materiales en obras de construcción, minería y otras actividades relacionadas. La excavadora consta de una estructura principal que incluye una cabina para el operador, un brazo extensible con un cucharón en el extremo y un sistema de orugas o ruedas para la movilidad.

La norma UNE-EN ISO 115443:2003 [19] “Maquinaria para movimiento de tierras. Excavadoras hidráulicas. Terminología y especificaciones comerciales”, define excavadora hidráulica como:

“Excavadora autopropulsada sobre ruedas, cadenas o patas, con una estructura superior capaz, normalmente, de efectuar un giro de 360°, con un equipo cuya principal función es la de excavar mediante una cuchara, sin que la estructura portante se desplace durante un ciclo de trabajo de la máquina y que utiliza un sistema hidráulico para accionar los equipos montados sobre la máquina básica.”

Una excavadora consta de varios componentes, como la casa, el tren de rodaje, la pluma, el palo y el cubo, todos impulsados por motores y pistones. Estos equipos se utilizan principalmente para cavar zanjas, agujeros y cimientos, cargar, girar y desplazar objetos en diversas industrias, como silvicultura, minería y construcción. También se emplean en tareas de demolición, manejo de materiales y levantamiento pesado de objetos. [20]

El movimiento de la excavadora se logra mediante el brazo excavador y la cuchara, con la presión hidráulica generada por una bomba hidráulica. Trabajan desde el nivel del suelo hacia arriba, bajando el cucharón, aplicando fuerza y tensión para recoger material. La capacidad óptima de corte depende de factores como el tipo de suelo y el tamaño del cucharón.

Existen excavadoras de gran escala para trabajos grandes y miniexcavadoras más pequeñas y ligeras, ideales para zanjas y trabajos de servicios públicos debido a su facilidad de transporte.

Las excavadoras constan de tres partes principales: [21]

1. Estructura Inferior:

Esta parte permite el desplazamiento de la excavadora hacia la zona de trabajo y sirve como base para la estructura superior. Hay dos tipos principales: sobre orugas, que ofrecen gran estabilidad, pero baja velocidad de traslación, y sobre neumáticos, que pueden moverse como vehículos motorizados, pero son menos estables.

2. Estructura Superior:

Incluye la cabina rotatoria y la casa de máquinas, que contiene la maquinaria para levantar, girar y empujar, así como los controles para operarla. La cabina operador se encuentra en posición elevada y contiene el sistema hidráulico que controla los movimientos del brazo excavador y la cuchara.

3. Brazo Excavador:

Esta parte delantera de la máquina incluye la pluma, el brazo, la pala o cuchara, la base, los cilindros hidráulicos y el equipo necesario para su movimiento. La pluma y el brazo están hechos de planchas de acero y permiten sostener y controlar la carga. La base sirve de apoyo a la pluma y puede fijarse a una estructura de soporte. Los cilindros hidráulicos reciben aceite a presión para generar movimiento, y todo el sistema es alimentado por una bomba hidráulica que se acciona mediante el motor de la excavadora. La capacidad de excavación depende del tamaño de la cuchara, que se conecta al extremo del brazo excavador.

El brazo de la excavadora puede moverse en varias direcciones, lo que permite al operador alcanzar y excavar en diferentes áreas con facilidad. El cucharón en el extremo del brazo se utiliza para recoger y cargar materiales, como tierra, rocas o escombros. Además, de tener diferentes configuraciones dependiendo sus capacidades de carga, aplicación, modelos y tecnologías, teniendo equipos tan distintos como;

- *Equipo de excavación frontal:*

Consiste en una pluma, articulaciones de brazos y una cuchara frontal que corta hacia fuera de la máquina y generalmente hacia arriba. Se emplea principalmente para la excavación por encima del plano de referencia al suelo, como se muestra en la figura 10.



Figura 10 Modelo de excavadora frontal - Modelo Liv Gong 922E

- *Equipo de cuchara bivalva:*

La excavadora de cuchara bivalva es una variante especializada de excavadora que utiliza un tipo específico de cucharón, conocido como cuchara bivalva. Este tipo de cuchara tiene dos mandíbulas móviles que se asemejan a las mandíbulas de una pinza, permitiendo que la excavadora pueda agarrar y manipular materiales de una manera similar a una pinza de la figura 11.



Figura 11 Modelo de excavadora de cuchara bivalva-Modelo KINSHOFER C18VE

- *Equipo de pluma telescópica:*

Es una variante de la excavadora convencional que incorpora un brazo o pluma telescópica. A diferencia de la pluma estándar, la pluma telescópica puede extenderse y retraerse, lo que proporciona una mayor versatilidad y alcance en las operaciones de excavación y levantamiento de la figura 12.



Figura 12 Modelo de excavadora de pluma telescópica-Modelo Relong RLTA230

Los componentes de las excavadoras se explican en la siguiente figura 13. Siendo estas piezas las cuales se caracterizaron en el CAD.



Figura 13 Descripción de partes de pluma y brazo

Como se puede observar, se puede tener diferentes configuraciones de plumas, brazos y excavadoras en general, pero, sobre el tema contamos con 2 tipos de plumas;

Una pluma de monobloque se refiere a una configuración específica del brazo de una excavadora. En este diseño, la pluma y el brazo están integrados en una sola pieza o estructura, a diferencia de las excavadoras convencionales que tienen una pluma y un brazo separados, como se ve en la figura 14.



Figura 14 Pluma monobloque

Una excavadora con una pluma y un brazo intermedio se refiere a una configuración en la que la pluma y el brazo no son una única estructura continua, sino que están conectados mediante un componente adicional conocido como brazo intermedio. Esta disposición proporciona mayor flexibilidad y alcance en comparación con una configuración de pluma de monobloque, como se ve en la figura 14.



Figura 15 Pluma con brazo intermedio

1.9.1 Capacidades de carga de la excavadora.

La eficiencia y rendimiento de una excavadora dependen en gran medida de la robustez y diseño de sus componentes clave, como la pluma y el brazo. El CAD se enfoca en la estructura con una capacidad de carga y excavación, de 15 toneladas (147.1 kN). Esto nos permite explorar y optimizar la topología de estos elementos esenciales, asegurando una combinación óptima de resistencia, peso y eficiencia en el rendimiento. Siendo el diseño aplicado solo para uso académico y en función del sistema empleado.

El desafío en encontrar el equilibrio entre la resistencia estructural necesaria para soportar cargas considerables y la necesidad de mantener un diseño liviano que permita una mayor maniobrabilidad y eficiencia energética. A continuación, profundizaremos en la descripción detallada del CAD de la pluma y el brazo, destacando las características para lograr el diseño optimizado y eficiente.

1.9.2 Material empleado.

Los brazos de excavadoras suelen fabricarse con acero de alta resistencia debido a la necesidad de soportar cargas pesadas y resistir el desgaste durante operaciones de excavación intensivas. Cuyas propiedades mecánicas deben cumplir lo expuesto en la norma UNE 10025. El acero estructural de alta resistencia proporciona las características necesarias para resistir las fuerzas extremas y las tensiones asociadas con la manipulación de materiales pesados y la excavación en diversas condiciones. En particular, algunos de los aceros de alta resistencia utilizados en la fabricación de brazos de excavadoras incluyen:

- *Acero de Alta Resistencia (HSS) [22]:*

Este tipo de acero se distingue por su elevado límite elástico y resistencia a la tracción en comparación con el acero convencional. Los grados de acero de alta resistencia, como el ASTM A514 o el EN 10025-6 S690, son comunes en la fabricación de componentes estructurales de maquinaria pesada.

También conocidos como aceros de baja aleación, se destacan principalmente por su notable rigidez y capacidad de absorción de grandes cantidades de energía, así como por su resistencia a la deformación. Estos se emplean en situaciones donde se demanda una elevada capacidad de absorción de energía sin comprometer la integridad estructural, lo que permite la fabricación de una amplia gama de productos.

Presentan contenidos medio a alto de carbono, lo que los hace inherentemente difíciles de soldar. Sin embargo, al reducir los elementos que se alean entre sí y disminuir el contenido de carbono hasta un 0,3% o incluso un 0,1%, se mejora significativamente la soldabilidad y la portabilidad del acero sin sacrificar su resistencia.

Gracias a sus cualidades, estos aceros de baja aleación encuentran aplicaciones en diversos sectores, siendo la construcción su principal ámbito de aplicación. Estos aceros se utilizan para lograr una mayor templabilidad, lo que a su vez mejora otras propiedades mecánicas. También son empleados para aumentar la resistencia a la corrosión en condiciones ambientales específicas.

- *Acero de Construcción de Alta Resistencia (HSLA) [23]:*

Los aceros de baja aleación de alta resistencia (HSLA, por sus siglas en inglés) incorporan pequeñas cantidades de aleaciones como niobio, vanadio y titanio para mejorar sus propiedades mecánicas. Reconocidos por su combinación de resistencia y tenacidad, estos aceros son ideales para aplicaciones exigentes, como la fabricación de brazos de excavadoras.

El acero HSLA representa una aleación que proporciona propiedades mecánicas mejoradas y una mayor resistencia a la corrosión atmosférica en comparación con el acero al carbono tradicional que no se diseñan para cumplir con una composición química específica, sino para alcanzar propiedades mecánicas particulares.

La composición química de los aceros HSLA incluye un bajo contenido de carbono (entre 0.05% y 0.25%) para garantizar conformabilidad y soldabilidad adecuadas, así como un contenido de manganeso de hasta un 2%. Los componentes restantes varían según el espesor del producto y los requisitos de las propiedades mecánicas, pudiendo incluir cromo, molibdeno, níquel, cobre, vanadio, niobio, nitrógeno, circonio y titanio en diversas combinaciones.

La resistencia del acero HSLA se fortalece mediante la adición de vanadio, niobio, cobre y titanio, logrando límites elásticos superiores a 275 MPa o 40 ksi . Sin embargo, esta alta resistencia implica que estos aceros suelen requerir entre un 25% y un 30% más de potencia para su formación en comparación con los aceros al carbono tradicionales.

La resistencia a la corrosión del acero de baja aleación de alta resistencia se mejora con la incorporación de silicio, cobre, cromo y fósforo. La portabilidad se potencia con la inclusión de elementos poco convencionales como circonio y calcio, que proporcionan control sobre la forma de inclusión de sulfuro.

Los aceros HSLA encuentran aplicaciones en la fabricación de vehículos, camiones, equipos de construcción, como grúas, y estructuras de gran envergadura sometidas a actividad mecánica constante, como montañas rusas. Diseñados para soportar altos niveles de estrés, estos aceros ofrecen una excelente relación entre resistencia estructural y peso del producto.

- *Acero de Aleación Especial:*

En ciertos escenarios, es viable recurrir a aceros de aleación especializados para satisfacer requisitos específicos de resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. Ejemplos notables de estos aceros incluyen el AR400 o el HARDOX, reconocidos por su alta dureza y capacidad de resistir el desgaste.

La elección del material dependerá de varios factores, como las condiciones de trabajo previstas, el entorno ambiental, los requisitos de resistencia y la durabilidad esperada. Los fabricantes de excavadoras buscan equilibrar la resistencia y la durabilidad considerando aspectos prácticos y económicos para garantizar un rendimiento óptimo de los brazos de excavadoras en diversas aplicaciones y entornos de trabajo.

Cuando nos referimos a un acero como "*especial*", estamos indicando que sus propiedades han sido modificadas intencionadamente para un propósito específico. La fabricación de aceros implica procesos y controles rigurosos que logran una composición química precisa, alta pureza y propiedades mejoradas para su aplicación prevista. Esto se logra principalmente de dos maneras: mediante la adición de elementos aleantes como cromo, molibdeno, vanadio, níquel, etc.

De esta manera, se obtienen aceros con propiedades significativamente superiores a las del acero convencional, adaptados a necesidades específicas de la industria. Estos aceros especiales se utilizan en diversas aplicaciones, como aceros para temple y revenido, cementación, herramientas e inoxidable, entre otros.

La importancia de los aceros especiales en las industrias modernas radica en varios factores:

- Permiten el diseño de componentes más livianos y resistentes, esencial en sectores como el transporte, donde la reducción de peso es crucial.
- Posibilitan la exposición de los materiales a condiciones extremas de temperatura, presión y corrosión, inimaginables con otros tipos de aceros.
- Su amplia variedad ofrece la posibilidad de elegir el acero óptimo para cada aplicación específica.
- Mejoran la seguridad, durabilidad y rendimiento de máquinas, equipos e instalaciones.
- Contribuyen al ahorro energético y la eficiencia.

Estos materiales desempeñan un papel fundamental en innumerables aplicaciones críticas presentes en nuestra vida diaria, y resulta difícil imaginar el mundo actual sin la existencia de los aceros especiales.

1.9.3 Innovación de las excavadoras

En la actualidad, existen excavadoras que superan los 225 metros de longitud y los 96 metros de diámetro, con un peso que supera las 13000 toneladas, siendo capaces de remover cerca de 240 mil metros cúbicos de tierra por día. Sin embargo, para comprender el alcance de este desarrollo tecnológico, es fundamental conocer las raíces de las maquinarias de excavación.

En 1835, se llevó a cabo la construcción de la primera excavadora mecánica, como se muestra en la figura 16, aprovechando el auge tecnológico de las máquinas movidas por vapor. El creador fue un joven estadounidense llamado William Otis.

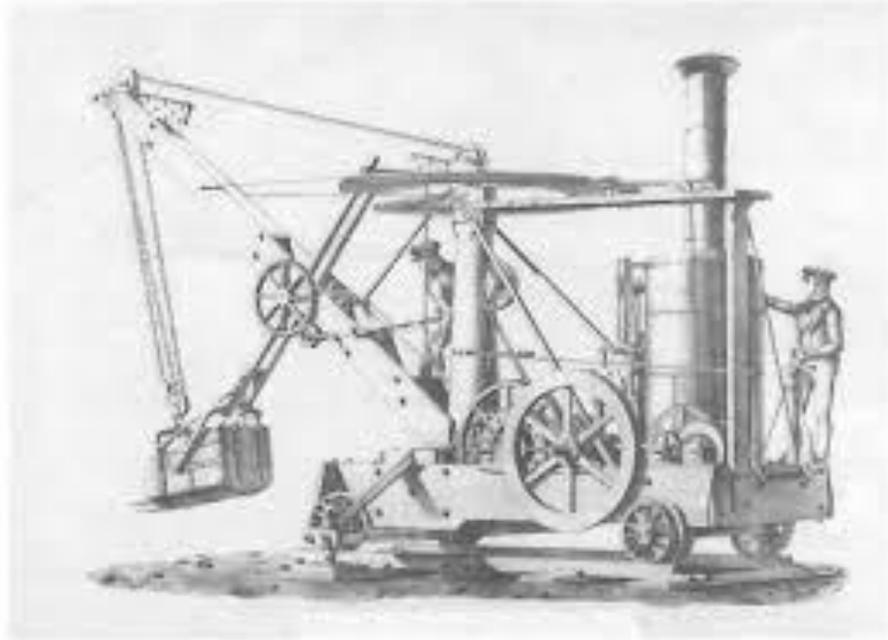


Figura 16 Primera excavadora de vapor - William Otis - 1835

Otis propuso el primer diseño de la excavadora, enfocándose en la optimización del tiempo requerido para las excavaciones destinadas a las vías del tren. La implementación de la maquinaria propuesta por Otis supondría la reducción del número de trabajadores necesarios, comparado con el método tradicional de picos y palas, lo que significaba un ahorro significativo de tiempo y dinero.

El 24 de febrero de 1839, William Otis obtuvo la primera patente, describiéndola como una "Grúa-excavadora para excavación y remoción de tierra". Esta patente especificaba que la máquina podía emplearse en la excavación para la construcción de ferrocarriles y tareas similares.

La patente detallaba la instalación de un motor de vapor, común para la época, que, mediante un sistema de poleas, una cuchara de excavación y un mecanismo de control de potencia, permitía el desplazamiento de hasta 380 metros cúbicos de tierra por día. La primera excavadora fue oficialmente utilizada en 1839 en la construcción del ferrocarril occidental de Massachusetts, que conectaría con Nueva York.

Sin tomar en cuenta el tamaño, que puede variar desde gigantes de miles de toneladas hasta pequeñas de un par de toneladas, del estilo, ya sea sobre orugas o ruedas, y de la aplicación, que abarca desde dragado subacuático hasta excavaciones mineras, la tarea fundamental de las excavadoras sigue siendo la misma: extender, cavar, extraer y volcar.

En la actualidad los fabricantes de excavadoras en el mundo incorporan esas cuatro funciones básicas como el fundamento de cada uno de sus productos. No obstante, con los avances tecnológicos en áreas clave de la hidráulica y del posicionamiento preciso, gracias a sistemas como el de navegación global por satélite (GNSS), las excavadoras del siglo XXI han dejado atrás a las pioneras de la industria.

1.9.4 Tecnología Topcon

Topcon proporciona sistemas de control de maquinaria que integran tecnologías GNSS para ofrecer un posicionamiento preciso en tiempo real. Estos sistemas permiten a los operadores de excavadoras y otras máquinas de construcción llevar a cabo tareas con mayor exactitud, optimizando el rendimiento y reduciendo el tiempo y los recursos necesarios. [24]

El control de altitud y pendiente es esencial para garantizar la profundidad de excavación requerida y gestionar las pendientes de manera automática. Al ajustar automáticamente la altura de la excavadora, se logra una excavación precisa y eficiente que cumple con los criterios de diseño, mientras controla de forma automática las pendientes para mantenerlas dentro de los parámetros establecidos. Esta funcionalidad no solo mejora la precisión del trabajo, sino que también optimiza la productividad al minimizar la intervención manual del operador.

De igual manera, el monitoreo instantáneo acerca de la ubicación y el rendimiento de la maquinaria, permitiendo una toma de decisiones más informada. Este sistema proporciona datos en tiempo real sobre el estado y la actividad de la maquinaria, brindando a los operadores y gestores una visión detallada y actualizada.

Estos sistemas de tecnología Topcon en las excavadoras son valiosos en proyectos de construcción grandes y complejos, donde la precisión y la eficiencia son críticas. Es posible que haya habido avances o nuevas incorporaciones a la tecnología de Topcon después de mi última

actualización, por lo que te recomendaría verificar las últimas fuentes de información para obtener detalles actualizados sobre sus productos y características.

El diseño de las excavadoras ha experimentado dos modificaciones significativas desde su invención. El cambio ha sido notablemente drástico, evolucionando desde las excavadoras de vapor con sistemas de poleas, que eran transportadas por las vías férreas, hacia las modernas excavadoras hidráulicas.

Las excavadoras hidráulicas representan un avance significativo al incorporar sistemas hidráulicos para el control de sus movimientos. Este cambio permite una mayor eficiencia y versatilidad en las operaciones de excavación. Estas máquinas ahora cuentan con movimientos autónomos, gracias a la adopción de ruedas u orugas, lo que les confiere una movilidad mejorada en terrenos variados. Además, se han adaptado incluso para aplicaciones náuticas, siendo utilizadas en barcos para trabajos específicos en entornos acuáticos.

A pesar de estas transformaciones tecnológicas significativas, el principio estructural relacionado con las plumas y brazos se ha mantenido constante a lo largo de los años desde su invención. Este diseño esencial proporciona la capacidad de levantar, cavar y manipular materiales de manera efectiva, y su persistencia destaca la robustez y eficacia de este componente clave en las excavadoras modernas. Así, a pesar de las innovaciones en la propulsión y el control, la esencia estructural de las excavadoras sigue siendo un elemento fundamental y duradero en el campo de la maquinaria de construcción y es por eso por lo que este trabajo se propone una alternativa a los diseños convencionales de la pluma y brazo de las excavadoras.

1.10 Optimización topológica en ANSYS

En la búsqueda constante de eficiencia y rendimiento en el diseño de maquinaria pesada, la implementación de tecnologías avanzadas se ha convertido en un componente crucial. La simulación y optimización topológica (OT) emergen como herramienta fundamental para maximizar la funcionalidad y la resistencia de los componentes estructurales. Este proceso se vuelve especialmente relevante al considerar elementos cruciales como la pluma y el brazo de una excavadora, cuyo rendimiento impacta directamente en la productividad y durabilidad de la máquina.

El uso especializado del software de simulación avanzada, diseñado específicamente para la generación de la OT. Abordando desde los conceptos estructurales hasta técnicas de optimización topológica. Para proporcionar casos prácticos y estudios de casos específicos relacionados con excavadoras.

Como en la OT, se requiere el análisis de fuerzas, resistencia y deformación de las piezas, se requiere trabajar con un software especializado es ese tipo de simulación, siendo uno de ellos y con el que se trabajó en este proyecto es Ansys Mechanical, Un software que, gracias a su generación de mallado, nos permite trabajar en una forma mixta de un mallado en 2D y 3D, además de ser autónomo al tipo de enmallado más conveniente para la obtener la mejor de la optimización para la pieza entre sus diversos algoritmos de simulación.

La OT en ANSYS es un sistema de optimización de “*Drag&Drop*” que, genera el análisis estático y la OT en el mismo apartado de *Ansys Workbench* y ayudarnos a trabajar por objetivos, donde podremos seleccionar el máximo rango de rigidez, la máxima frecuencia natural y poder minimizar la masa, volumen y tensiones.

Comenzando con este enfoque integrado en el diseño promueve la innovación y contribuye a la creación de maquinaria más robusta y eficiente en la industria de la construcción, comenzando con la OT de una repisa.

1.10.1 Principios de caracterización en el software

La optimización topológica y el análisis estructural son dos disciplinas fundamentales en el ámbito del diseño de software, especialmente cuando se busca maximizar la eficiencia y el rendimiento de un sistema. La caracterización de software en este contexto se convierte en un proceso esencial para comprender y mejorar la distribución de recursos y la resistencia estructural.

Los principios fundamentales de la caracterización en software para la optimización topológica y el análisis estructural. Estos principios se centran en la identificación y evaluación de las características clave del software, como la conectividad, la redundancia, la escalabilidad y la eficiencia en términos de recursos. A través de este análisis, los ingenieros de software pueden tomar decisiones informadas para mejorar la arquitectura del sistema, reducir los cuellos de botella y garantizar una distribución óptima de la carga de trabajo.



Al comprender cómo se interconectan los diferentes componentes del software y cómo responden a las cargas y demandas, se puede lograr una optimización topológica eficaz. Además, el análisis estructural permite evaluar la resistencia y estabilidad del sistema frente a diversas condiciones y escenarios de uso, contribuyendo así a la creación de software robusto y capaz de enfrentar los desafíos del mundo real. Como a continuación se muestra la OT, en una pieza que se denomina repisa que se muestra en la Figura 17, esto para conocer el principio de funcionamiento de la OT utilizando Ansys.

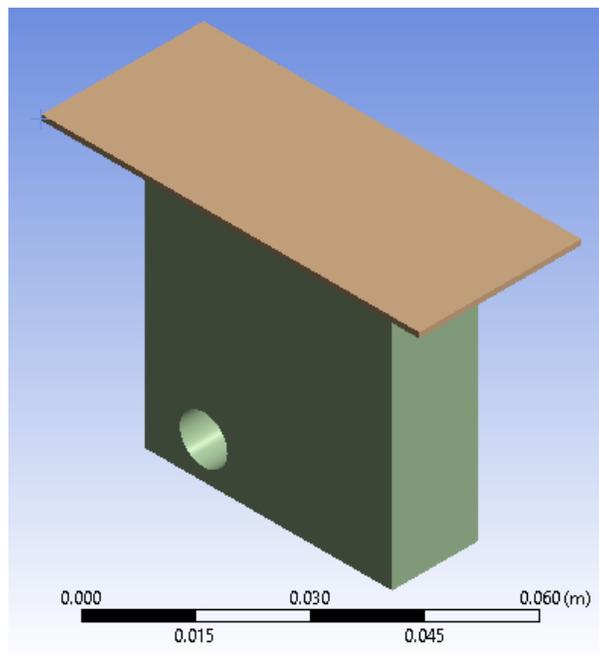


Figura 17 Diseño de la pieza "Repisa"

En la plataforma de *Ansys Workbench*, se aplican los recuadros en *Static Structural* y *Structural Optimization*, Donde se carga la geometría, el modelo y se hacen la relación de estudio entre los análisis, como se muestran en la figura 18.

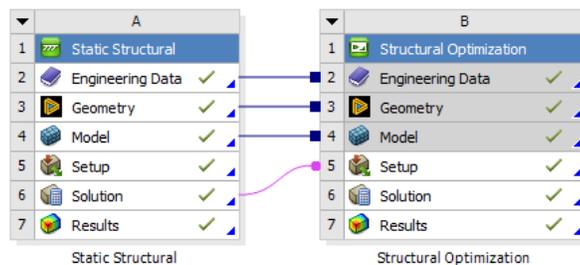
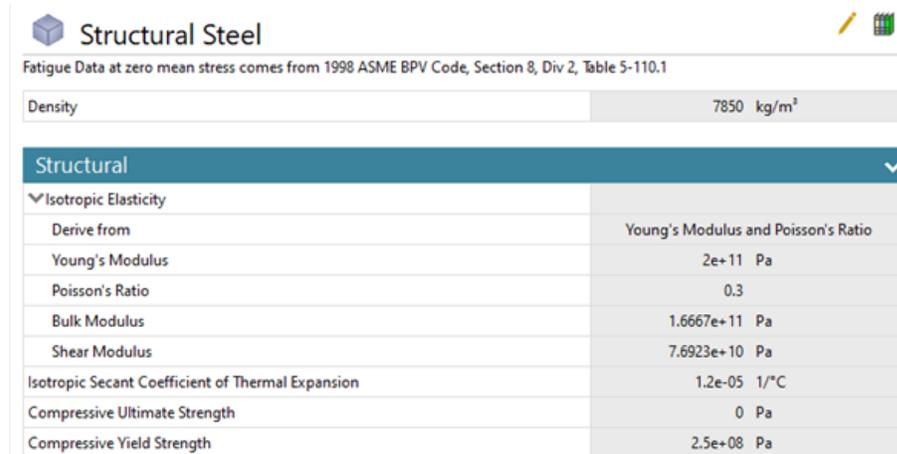


Figura 18 Panel de Workbench para la configuración de la optimización

Para que en la solución de Structural Optimization, recuadro “B”, colocaremos la selección de pasos para que nos dirigen a Ansys Mechanical. Donde en la plataforma del programa, le asignamos el material, siendo esta una estructura de acero, como se ve en la figura 19.



Structural Steel

Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Density	7850 kg/m ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+11 Pa
Poisson's Ratio	0.3
Bulk Modulus	1.6667e+11 Pa
Shear Modulus	7.6923e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 Pa
Compressive Yield Strength	2.5e+08 Pa

Figura 19 Asignación del material para la repisa

En el Análisis *Static Structural*, generaremos unos soportes dentro de los vértices de lo que es la parrilla de carga, tal como se muestra en la figura 20.

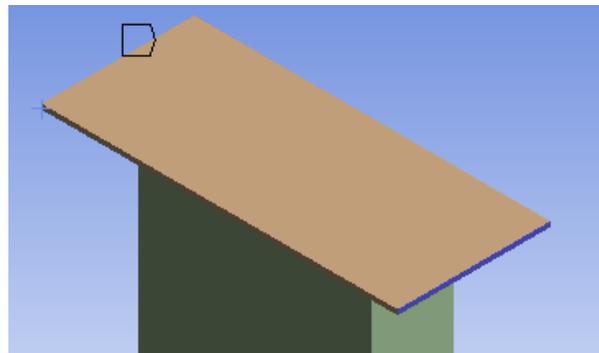


Figura 20 Soporte del vértice en la repisa

Dentro de la sujeción, aplicaremos una fuerza de $-400N$, en el plano Y , como se ve en la figura 21.

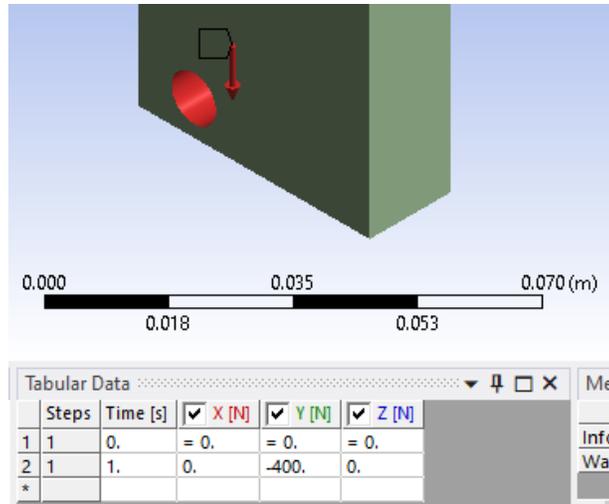


Figura 21 Asignación -400N de fuerza en eje Y

Además de generar un momento de $500 \text{ N}\cdot\text{m}$ sobre el mismo soporte, Figura 22.

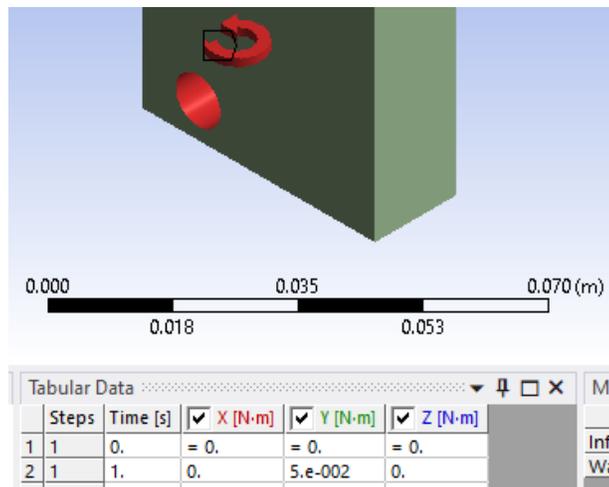


Figura 22 Generación de momento de 500Nm

Culminado con estos análisis estáticos, generaremos la optimización estructural, Donde primero se realiza la Optimización de la plancha, excluyendo la parte del soporte, como se ve en la figura 23.

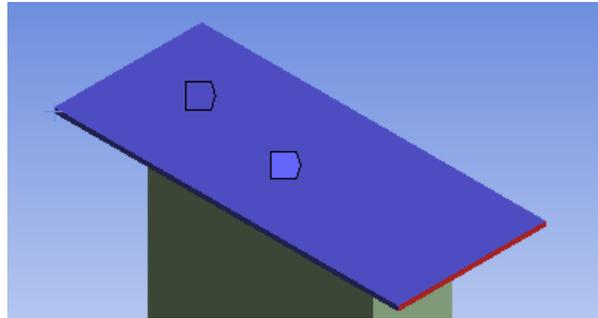


Figura 23 Exclusión de soporte en la plancha del soporte

Detallando la geometría de un solo cuerpo, para determinar que será la plancha, y el tipo de la optimización geométrica, para la misma. El siguiente paso, figura 24, la restricción de la Masa. Donde asignaremos que será la optimización de la región teniendo un porcentaje de retención del 110 %, figura 25.

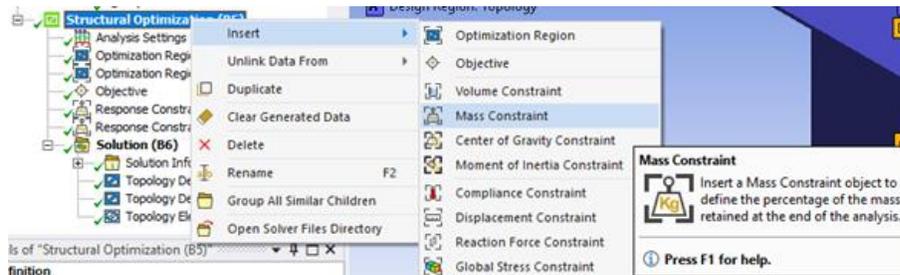


Figura 24 Restricción de la masa para definir el porcentaje del análisis

Details of "Response Constraint"	
Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region
Definition	
Type	Response Constraint
Response	Mass
Define By	Constant
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	110 %
Suppressed	No

Figura 25 Porcentaje de restricción al 110 % de la optimización para la plancha

Y para la optimización del soporte, se realizan los mismos pasos, pero en asignación del soporte. Donde, ahora se genera una restricción del 25 %, como se ve en la figura 26.

Details of "Response Constraint 2"	
Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region 2
Definition	
Type	Response Constraint
Response	Mass
Define By	Constant
<input type="checkbox"/> Percent to Retain	25 %
Suppressed	No

Figura 26 Porcentaje de restricción al 25 % de la optimización para el soporte

1.10.2 Soporte con casos de carga.

En el próximo caso de optimización, se van a realizar una optimización topológica a una pieza con diferentes puntos de soporte y sujeción. Para comenzar dentro de la interfaz de Workbench, tras insertar el recuadro de geometría se exportará el documento de la pieza, a su vez se añadirán 3 recuadros de “Static Structural” y uno sobre “Structural Optimization”, se relacionarán las geometrías y con los primeros 3 recuadros se alinearán los modelos de estos, teniendo una secuencia como en la figura 27.

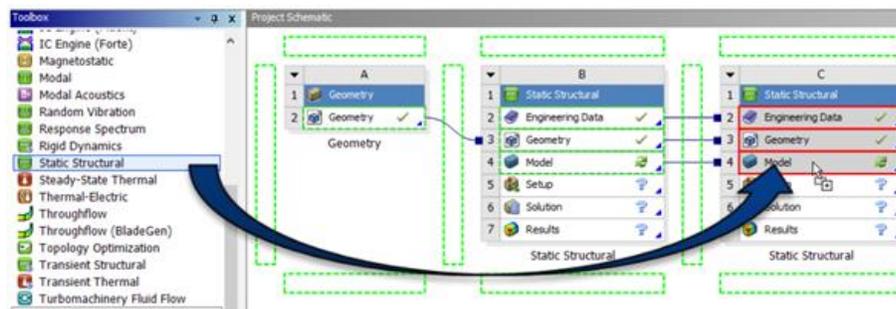


Figura 27 Panel en Workbench para el análisis multi-estático

Para trabajar con la simulación, se le da doble clic en el modelo de la celda B4, asegurándonos que la escala métrica se encuentre en (mm, t, N, s, . . .) y en la generación de la malla, figura 28 su tamaño sea de 3mm, como se describe en la figura 29.

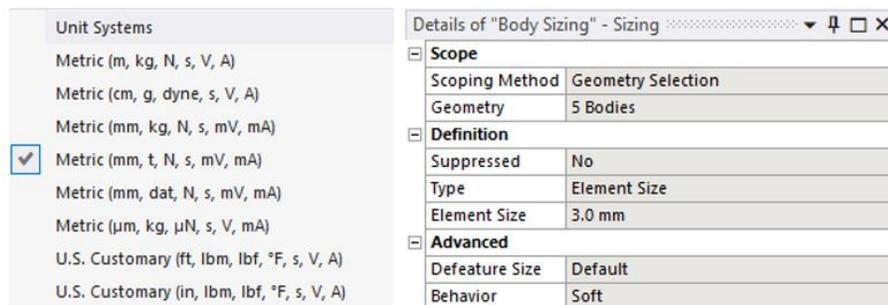


Figura 28 Asignación del sistema de unidades y determinación de escala para la malla

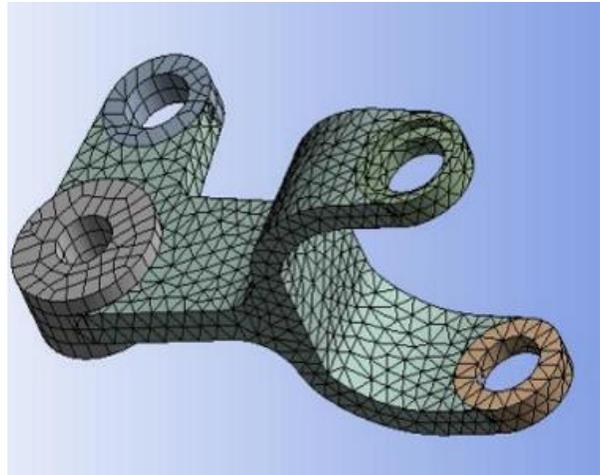


Figura 29 Pieza con malla de 3mm

Comenzando con la configuración estática estructural, en cada sección de estática estructural (B5, C6 y D5), insertaremos una fuerza para cada sección. En la primera configuración se aplicará una fuerza de 11N, en la sujeción superior y un soporte fijo en la sujeción inferior, como se muestra en la figura 30.

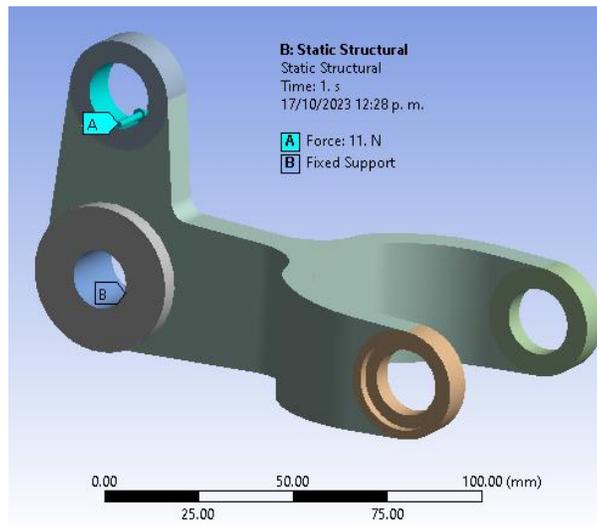


Figura 30 Soporte y fuerza de 11N para el primer análisis estático

De igual manera en la 2da configuración estático estructural se aplicará una fuerza de 1N, en la sujeción delantera izquierda y el soporte fijo seguirá siendo la sujeción trasera, como se muestra en la figura 31.

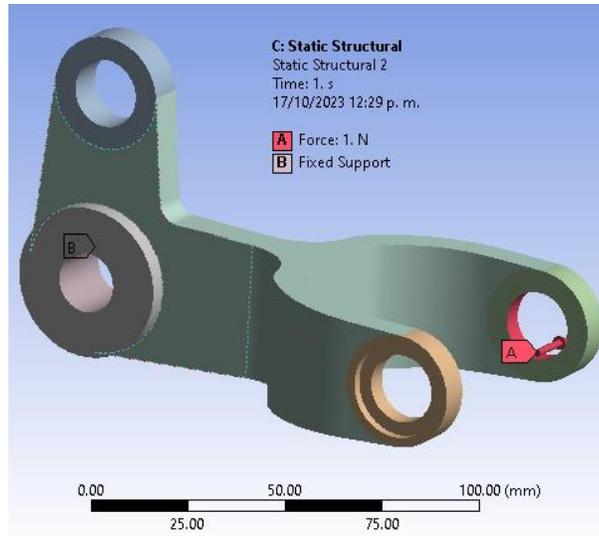


Figura 31 Soporte y fuerza de 1N para el segundo análisis estático

Y en la última configuración, se aplicará una fuerza de 1N, en la parte superior, pero en vez de una sujeción fija se insertará un desplazamiento remoto en ambas sujeciones delanteras, tal como se muestra en la figura 32.

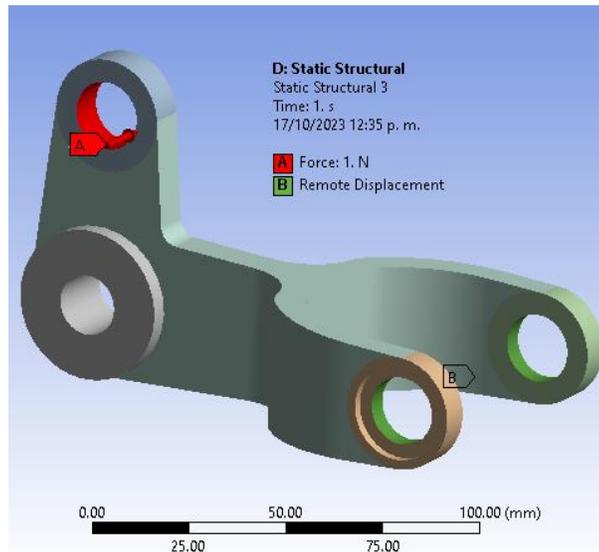


Figura 32 Desplazamiento remoto con fuerza de 1N para el tercer análisis estático

En cada una de estas configuraciones se van a realizar la solución de deformación total de la pieza, una vez cargada la simulación, empezamos a trabajar con el apartado de optimización estructural, donde al seleccionar todos los cuerpos, como se ve en la figura 33.

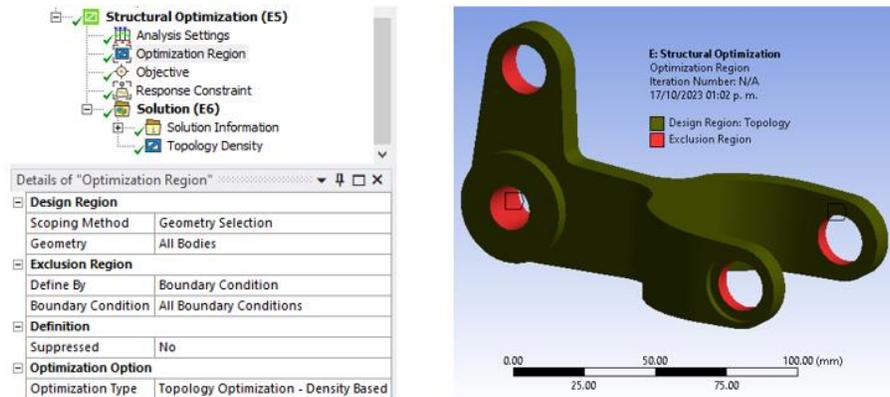


Figura 33 Asignación de cuerpos para la región de optimización

Resaltando el objetivo, se debe de cumplir que se realice en los 3 análisis, definiendo el peso como se muestra a continuación, en la figura 34.

Objective

Right click on the grid to add, modify and delete a row.

Enabled	Response Type	Goal	Criterion	Formulation	Environment Name
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural 2
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural 3

Figura 34 Objetivo de optimización

En la operación de restricción de respuesta, asignaremos la cantidad de masa que se desea optimizar, en este caso, como se muestra en la figura 35, es del 35 %, pero vario acorde a las especificaciones que se deseen.

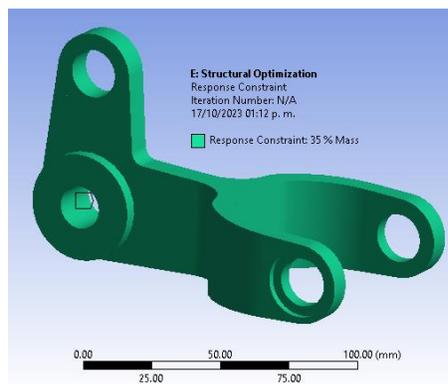


Figura 35 Restricción del 35 %

1.10.3 Reporte del primer criterio.

Siguiendo con la pieza, Se crea una nueva configuración desde Workbench. Tras un análisis estructural, se cargará una optimización, como se ve en la figura 36.

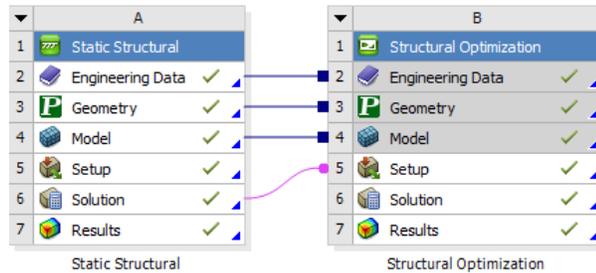


Figura 36 Configuración para el criterio en Workbench

Tras cargar la pieza, aplicarle fuerzas y desplazamientos para poder obtener su estudio. Desde la misma solución A6, insertaremos un “Criterio Primario”, en el apartado del “Criterio definido por el usuario”, asignándolo a la sujeción superior, como se muestra en la figura 37.

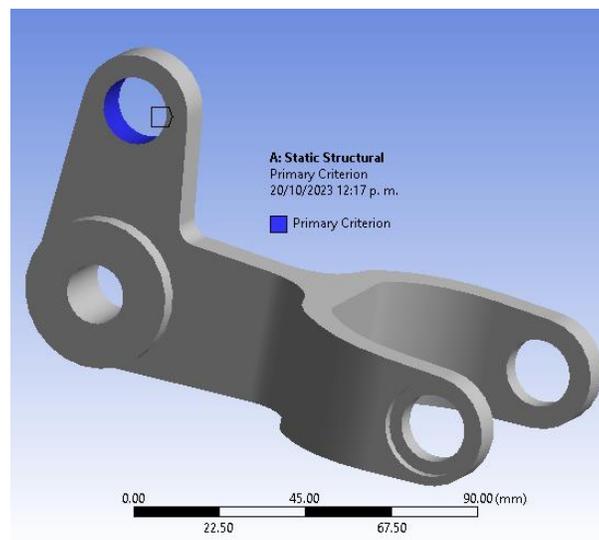


Figura 37 Asignación de criterio primario en la pieza

Se asigno en toda la pieza la "Structural Optimization" y en el apartado del objetivo, se selecciona una respuesta al volumen. Excluyendo solo a los sujetadores, como se muestra en la figura 38.

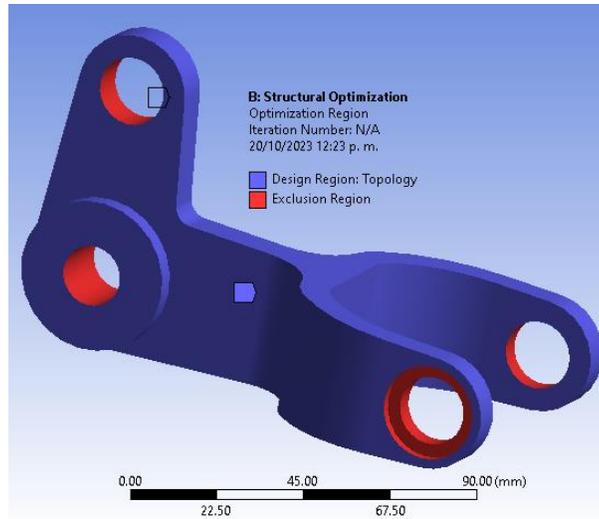


Figura 38 Asignación de la región para la optimización estructural

Antes de generar la OT, se asigna una restricción de criterio desde el apartado B5, como se muestra en la figura 39. Donde definimos los límites de 0.2mm.

Details of "Response Constraint"	
Definition	
Type	Response Constraint
Response	Criterion
Criterion	Primary Criterion
Initial Value	0.11607 mm
Lower Bound	Free
Upper Bound	0.2 mm
Suppressed	No

Figura 39 Límites a la respuesta del criterio

1.10.4 Optimización por capas de nivel.

En esta última pieza, se comparan los diferentes resultados de optimización obtenidos, cuando utilizando la optimización por densidad o la optimización por conjunto de niveles. Comenzando desde *Ansys Workbench*, insertaremos la geometría, exportando la pieza “*SIMPvsLevelSet*”, tras la geometría, insertaremos un recuadro del análisis estático estructural y 2 recuadros de Optimización topológica en la solución de la celda B6, tal como se muestra en la figura 40.

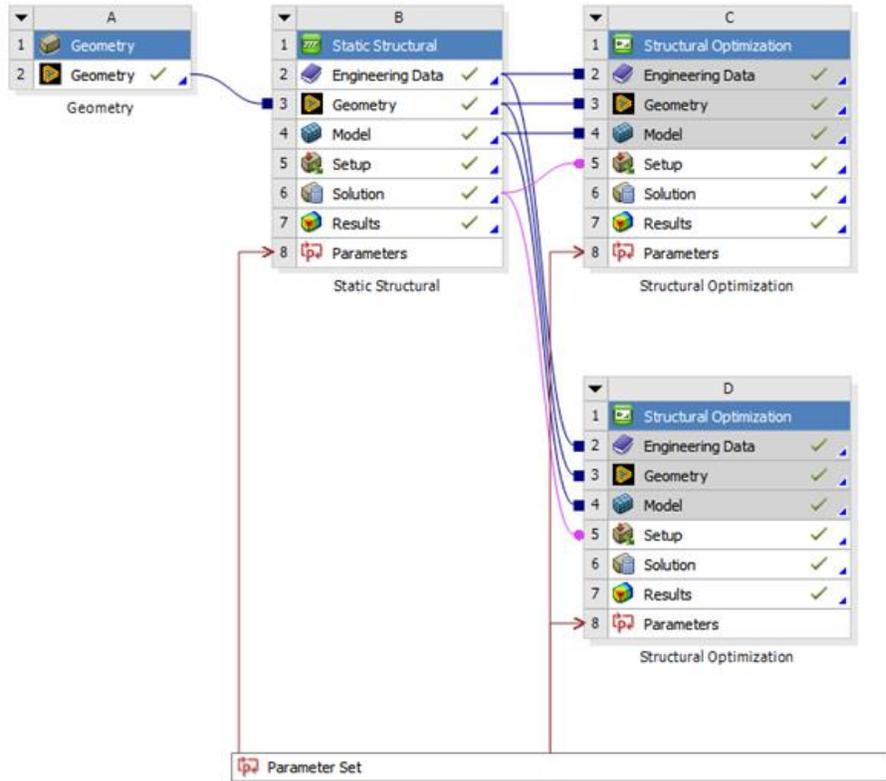


Figura 40 Panel de Workbench para la optimización por niveles

Tras abrir la solución del modelo, se restablecen las unidades en (mm, t, N, s, \dots) . En el emmallado, se inserta su tamaño de 5mm. Como se muestra en la figura 41.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
P Element Size	5.0 mm
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Behavior	Soft

Figura 41 Definición del tamaño de la malla a 5mm

Una vez asignado el mallado, se fijarán los soportes y aplicaremos una fuerza de 25,000 N en la dirección Z, como se muestra en las siguientes figuras 42 y 43.

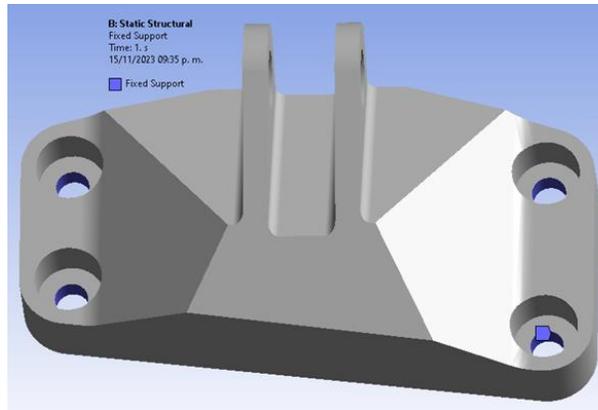


Figura 42 Empotramiento de la pieza

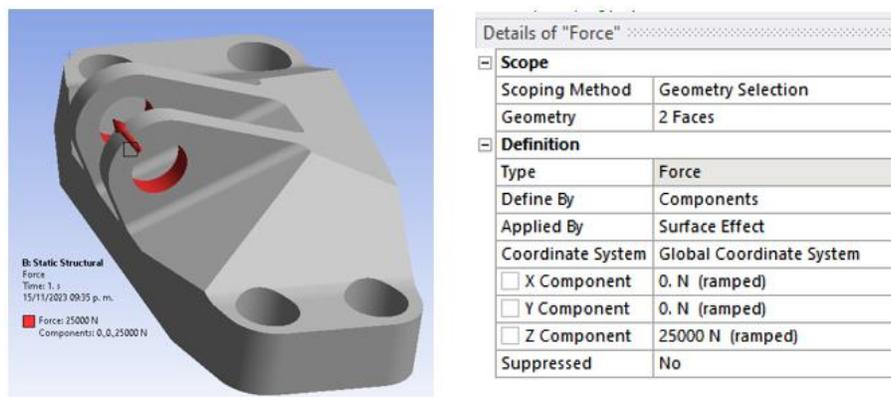


Figura 43 Aplicación de 25000N de fuerza en el eje Z

La OT del recuadro C5, asignaremos el tipo en la densidad de la base y en la OT del recuadro D5 seleccionaremos el tipo de densidad por conjunto de niveles, con un margen de restricción del 50 % en ambos casos, como se muestra en la figura 44.

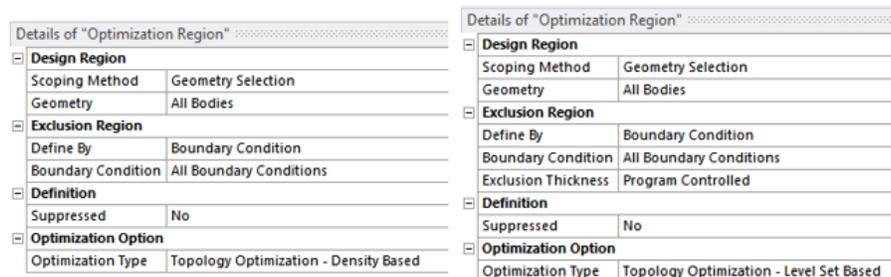


Figura 44 Detalles de las optimizaciones, por nivel y por densidad

CAPITULO II. METODOLOGÍA

2.1 Introducción a SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) y diseño de ingeniería asistido por computadora (CAE). SolidWorks es un programa con diversas disciplinas de ingeniería, como la mecánica, la electrónica y la arquitectura. Su funcionalidad principal radica en la creación de modelos 3D sólidos, permitiéndonos generar geometrías complejas.

Además, facilita la creación de ensambles, donde múltiples piezas se unen para formar un producto completo. Esta capacidad nos ayudó al diseño de la excavadora. El software también brinda herramientas de simulación que permiten evaluar el comportamiento de los diseños bajo diferentes condiciones, como tensiones, vibraciones y flujo de fluidos. El software también nos permitió la creación de modelos, la generación de dibujos técnicos, los planos esenciales para la fabricación.

2.2 CAD de la pluma y brazo de excavadora

Sabemos que las excavadoras, son piezas fundamentales en el sector de la construcción y la ingeniería, son máquinas robustas diseñadas para realizar tareas de excavación, carga y manipulación de materiales de manera eficiente. Dos componentes esenciales de estas poderosas máquinas son los plumas y brazos, mostrado en la figura 45, que desempeñan un papel crucial en la versatilidad y funcionalidad de las excavadoras.

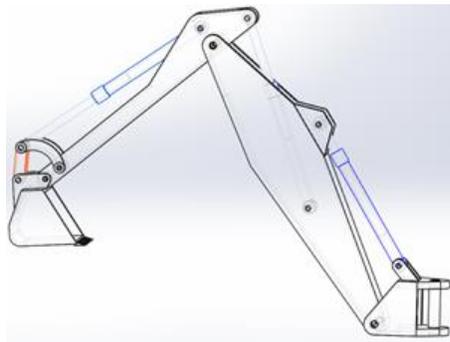


Figura 45 CAD de pluma y brazo de excavadora en SolidWorks

Los componentes en la figura 45 empleados se muestran en la siguiente tabla 1. Las diversas partes que componen estos elementos fueron proporcionadas por una empresa dedicada a la producción de estas mismas piezas, que por confidencialidad no puede ser mencionada y el uso de los diseños es de carácter académico sin fines de lucro, explicado eso, tenemos que, desde la base hasta la punta, destacando la importancia de cada componente en el rendimiento y la capacidad de estas máquinas para enfrentar una variedad de desafíos en entornos de construcción y obras civiles. Desde cilindros hidráulicos hasta articulaciones estratégicamente ubicadas, cada pieza desempeña un papel específico, contribuyendo al éxito de estas potentes herramientas de excavación.

Tabla 1 Componentes de la pluma y brazo

Lista de piezas		
Elementos	Cantidad	Piezas
1	1	Base
2	1	Pluma
3	1	Brazo
4	1	Bulón
5	3	Hidráulico
6	2	Tensor
7	1	Estabilizador
8	1	Cuchara

Donde las dimensiones se pueden ver en los anexos del documento, para tener una visualización específica de las dimensiones de los componentes.

2.2.1 Diseño de brazo.

Como podemos ver en la figura 46, el brazo se compone de la base del brazo, que se conecta a la parte superior de la pluma, proporcionando un punto de apoyo para las operaciones de excavación. La sección central del brazo se extiende desde la base hasta la punta, permitiendo maniobrar con destreza en el entorno de trabajo.

El cilindro de excavación controla el movimiento del cucharón, esencial para recoger y manipular materiales. Las conexiones de mangueras en el brazo suministran el fluido hidráulico necesario para el funcionamiento coordinado de los cilindros y otros componentes.

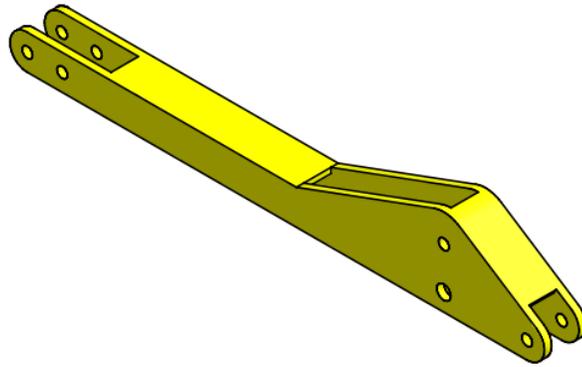


Figura 46 CAD del brazo de excavadora

2.2.2 Diseño de pluma.

En la figura 47, se puede ver la pluma consta de la base de la pluma, que se conecta al chasis de la excavadora, proporcionando estabilidad. La sección central de la pluma, ubicada entre la base y la punta, permite ajustar la distancia y altura de alcance.

El cilindro de elevación hidráulico controla el movimiento vertical de la pluma, permitiendo elevar y descender con precisión. Las conexiones de mangueras suministran el fluido hidráulico necesario para el funcionamiento de la pluma.

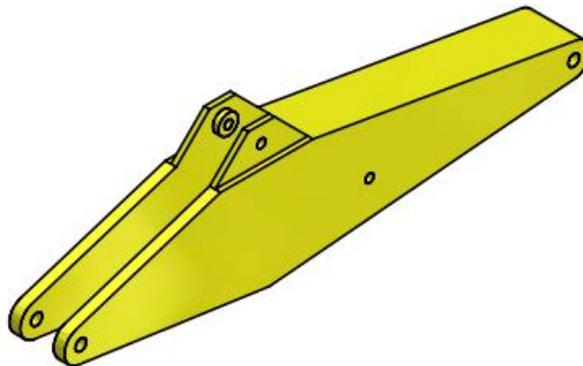


Figura 47 CAD de la pluma de excavadora

2.2.3 Definición de componentes.

Los componentes del sistema de excavadoras proporcionan la conexión estructural entre la máquina y sus componentes móviles, como la pluma y el brazo. Su funcionalidad principal radica en la estabilidad y soporte que ofrece a la excavadora durante diversas operaciones de excavación y manipulación de materiales.

- Base

La base de las excavadoras cumple un papel de proporcionar la conexión estructural sólida entre la máquina y sus componentes móviles, como la pluma y el brazo. Esta base, figura 48, se une al chasis de la excavadora para garantizar la estabilidad y resistencia, permitiendo que la máquina realice operaciones de excavación y manipulación de materiales.

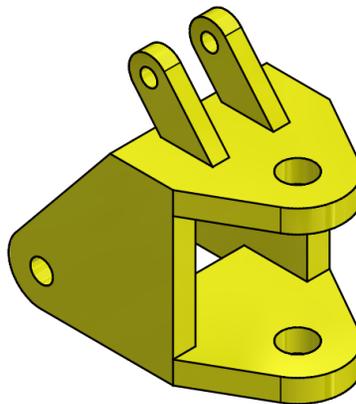


Figura 48 CAD de la base

- Bulón:

Los bulones son los elementos de fijación. Son pernos, como se ven en la figura 49, son elementos robustos se utilizan para unir varias partes móviles, como la pluma y el brazo, así como para conectar los implementos, como la cuchara. Su función principal es proporcionar una conexión segura y resistente que permita movimientos articulados controlados, garantizando la integridad estructural de la máquina durante las operaciones.

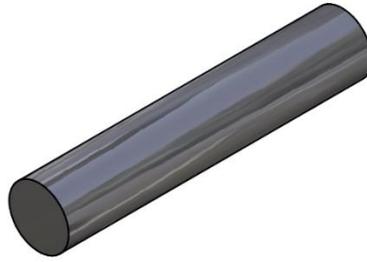


Figura 49 Diseño del Bulón

- Tensor:

También conocido como tensor de cadena, mueven los componentes móviles de la excavadora. Mantener la tensión correcta es esencial para el funcionamiento suave y eficiente de la excavadora, así como para prevenir el desgaste prematuro de las cadenas y otros componentes, su diseño se puede mostrar en la figura 50.

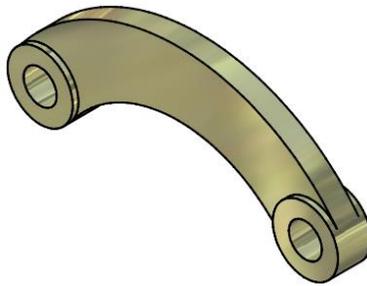


Figura 50 Diseño del Tensor

- Pistones Hidráulicos:

Estos cilindros impulsados por fluido hidráulico se utilizan para controlar y ejecutar movimientos precisos de la excavadora. Los pistones hidráulicos como se ven en la figura 51, permiten levantar, bajar, extender o contraer estas partes móviles, proporcionando la potencia necesaria para realizar una variedad de tareas de excavación y manipulación con precisión y eficiencia.



Figura 51 Ensamble del pistón

- Estabilizadores:

Como podemos visualizar en la figura 52, son componentes diseñados para proporcionar estabilidad adicional a la excavadora durante las operaciones. Por lo general, se despliegan en el chasis para aumentar la base de apoyo de la máquina, especialmente cuando se encuentra en terrenos irregulares o al realizar excavaciones en altura.

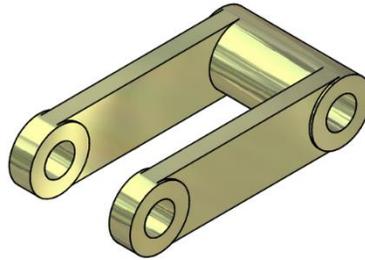


Figura 52 Diseño del estabilizador

- Cuchara:

La cuchara es el implemento principal de excavación de la excavadora. Se conecta al brazo mediante bulones y está diseñada para recoger, cargar y transportar materiales excavados. Las cucharas varían en tamaño y su diseño, como se ve en la figura 53, permiten a la excavadora adaptarse a diferentes tipos de trabajos de excavación, desde excavaciones precisas hasta movimientos de materiales a granel.

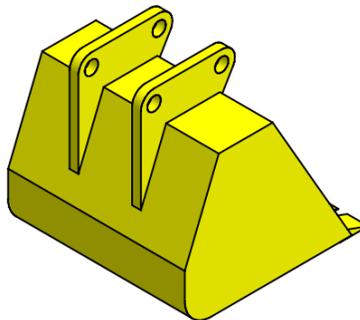


Figura 53 Diseño de cuchara para la excavadora

2.2.4 Ensamble del sistema.

La integración de los componentes para su funcionamiento parte de la base, anclada al chasis, establece la sólida conexión estructural que proporciona estabilidad durante las operaciones. Los bulones, nos permiten conectar las partes móviles, permitiendo movimientos articulados y controlados, mientras que los tensores aseguran la tensión adecuada en las cadenas, optimizando el rendimiento y evitando desgastes prematuros.

Los pistones hidráulicos, emergen como el motor dinámico del sistema, ejecutando movimientos precisos en la pluma, el brazo y otros implementos. Los estabilizadores, estratégicamente desplegados, aportan una capa adicional de seguridad y estabilidad en terrenos desafiantes. Finalmente, la cuchara, conectada al brazo, emerge como la herramienta maestra de excavación, capaz de recoger, cargar y transportar materiales con eficiencia.

El ensamblaje de componentes, como se puede ver en la figura 54, no solo define la funcionalidad de la excavadora, sino que también le otorga la versatilidad necesaria para abordar una amplia gama de tareas en el ámbito de la construcción y la ingeniería. Cada componente, desde la base hasta la cuchara, desempeña un papel crucial en la ejecución exitosa de las operaciones, dando vida a estas poderosas máquinas en el entorno desafiante de la obra.

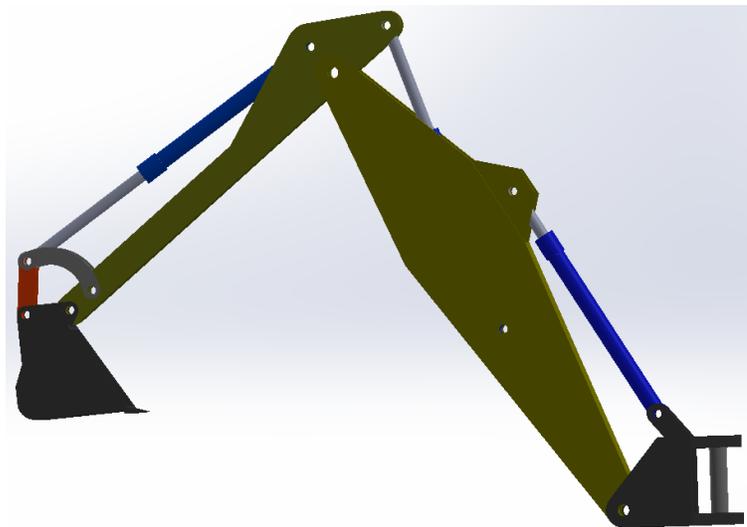


Figura 54 Brazo ensamblado en SolidWorks

2.3 Introducción a Ansys (Ansys Workbench)

ANSYS es una plataforma de simulación de ingeniería multidisciplinaria ampliamente utilizado en las industrias para realizar múltiples análisis estructurales, térmicos, de fluidos y electromagnéticos, entre otros tipos de simulaciones. La plataforma principal de ANSYS, conocida como Workbench, proporciona un entorno integrado para realizar estas simulaciones de manera eficiente y efectiva.

La interfaz de usuario de Workbench es intuitiva y fácil de usar, nos permite configurar, ejecutar y analizar simulaciones de manera eficiente. Como podremos visualizar, Workbench ofrece una amplia gama de herramientas de postprocesamiento para visualizar y comprender los resultados de la simulación, lo que facilita la toma de decisiones informadas en el diseño y la ingeniería de productos.

2.3.1 Configuración de Ansys Workbench

En la plataforma del software, el en panel izquierdo se arrastra el recuadro de geometría, como se muestra en la figura 55.

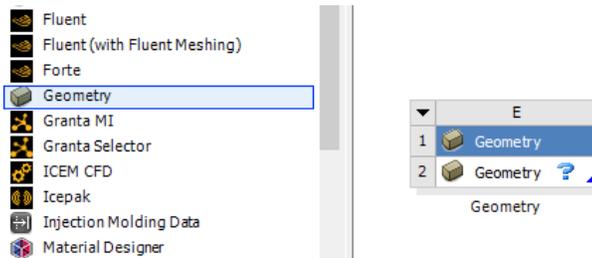


Figura 55 Recuadro para la geometría en Workbench

Seguido de eso, se colocaron 3 recuadros del análisis “*Static Structural*”, el primer reconectado al apartado “A2”, para que el siguiente sea conectado en el apartado “B4” y el tercero del “C4”, como podemos observar en la figura 56.

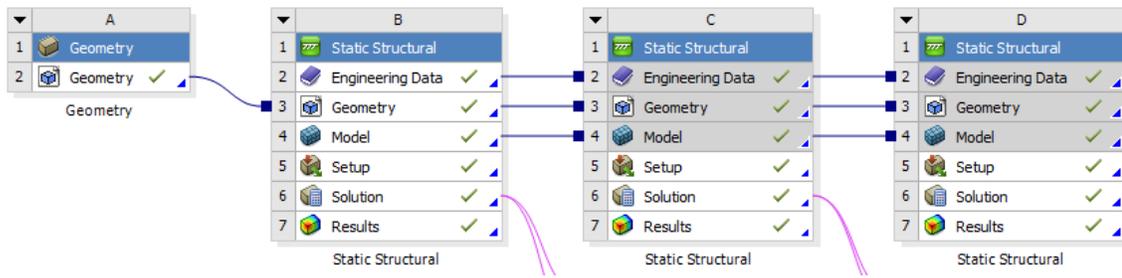


Figura 56 Recuadros del análisis "Static Structural" en Workbench

Estos recuadros servirán para poder generar los análisis estructurales, donde cargaremos nuestra pieza, siendo el diseño que previamente realizado en la figura 54, para posteriormente poder realizar la OT de la pluma y brazo.

Los recuadros de "Structural Optimization" Se anexará en los recuadros; "B6", "C6" y "D6" entrelazando las "Soluciones" en los recuadros con ambas optimizaciones, como lo podemos observar en la figura 57.

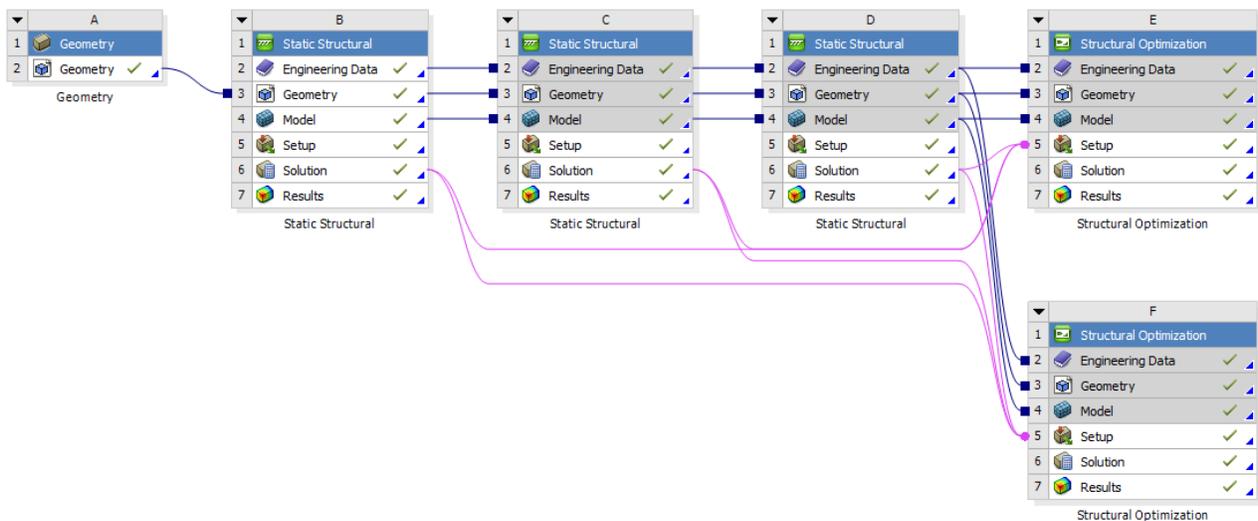


Figura 57 Configuración de recuadros en Workbench

Todo esto es un conjunto de subprogramas con los cuales podremos realizar los análisis de deformación de nuestras piezas y así poder realizar la OT correspondiente. Para poder acceder con las simulaciones, seleccionaremos el ultimo recuadro para que nos dirija al software de "Ansys Mechanical".

2.4 Ansys Mechanical

Dentro de “Workbench”, “Ansys Mechanical” es uno de los módulos más utilizados y completos. Se centra en análisis estructurales, permitiendo la simulación del comportamiento mecánico de componentes y sistemas en una variedad de condiciones de carga y entorno operativo.

Al abrir lo, podemos ver nuestra pantalla de inicio, como se muestra en la figura 58, la cual se parte en 3 secciones importantes, la barra de herramientas, en la parte superior, donde se pueden encontrar las herramientas básicas para el uso del software, en la parte izquierda, el panel de configuraciones o barra de configuraciones, donde podemos observar de manera descripta los recuadros que nosotros colocamos y analizamos previamente en “Ansys Workbench”.

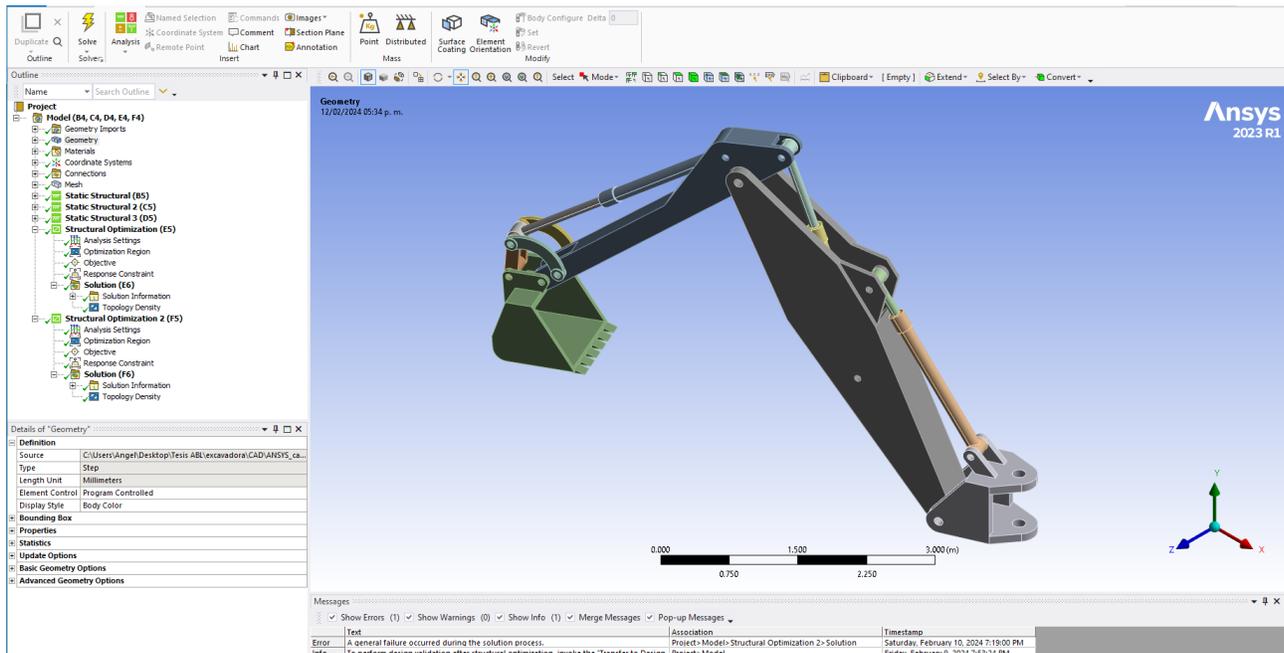


Figura 58 Panel de Ansys Mechanical

En la barra de configuraciones, figura 59, la cual controla toda la configuración de los recuadros de “Workbench”, en el encontramos aspectos muy importantes para la simulación, como lo son la geometría, materiales, puntos coordinales del sistema, malla, los 3 análisis estructurales y las optimizaciones estructurales.

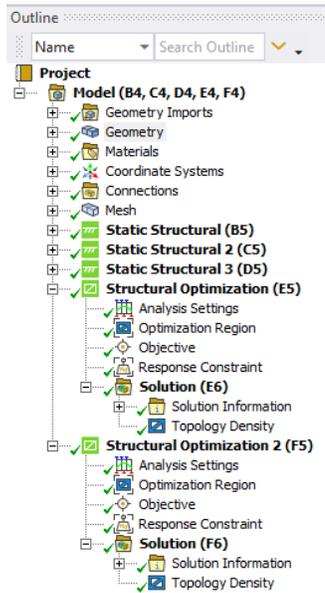


Figura 59 Barra de configuraciones en “Ansys Mechanical”

Siendo el primero e importante para aplicar, que es la configuración de materiales, figura 60, en el mismo se asigna el material específico con el cual contara nuestra o nuestras piezas, pudiendo configurar y utilizar diferentes materiales con diferente propiedades y configuraciones.

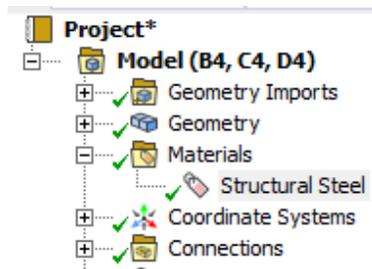


Figura 60 Configuración de material

Para nuestro caso de la pluma y brazo se utilizará el “Structural Steel”, figura 61, que gracias a sus propiedades podemos realizar el análisis genérico sobre las piezas, pero se puede especificar y clasificar acorde a las necesidades de un cliente.

Structural Steel	
Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
Density	7.85e-09 tonne/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Bulk Modulus	1.6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250 MPa

Figura 61 Asignación del material de acero estructural

El siguiente apartado, es importante de tomar en cuenta es el enmallado (*Mesh*), el cual es la malla de cuantas partes se seccionarán las piezas para poder realizar el análisis, mientras más fina sea la malla, más específico serán los análisis, pero al igual más recursos gastara de la memoria del equipo de cómputo, que es algo que se deberá tomara en cuenta, para este caso, utilizaremos una malla de “50mm” y se muestra cómo se ven en las siguientes figuras 62 y 63.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	13 Bodies
☐ Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5.e-002 m
☐ Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Behavior	Soft

Figura 62 Configuración de malla aplicándola a todos los componentes



Figura 63 Visualización con la pieza enmalla

2.4.1 Configuración de los análisis estructurales en el diseño completo.

Después de configurar las precondiciones, comenzamos a trabajar con los recuadros de “Análisis Estructural”. El primero de ellos es el del pistón que se encuentra en la pluma. En los “Puntos de Sujeción”, donde se encuentra en Bulón del brazo en la base, se aplica un "Fixed Support" para indicar que está fijo en ese punto, como se muestra en la figura 64.

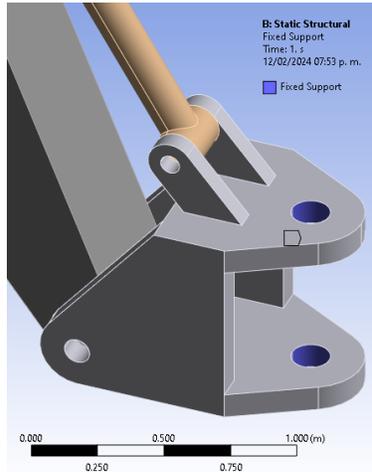


Figura 64 Sujeción en el bulón de la excavadora

Además, se aplica una carga en el eje Y en el punto de sujeción del pistón con el brazo. Estas cargas se expresan en newtons y se determinan en función de las fuerzas en las que la excavadora estará sometida durante su funcionamiento. En este caso particular, la carga aplicada es de 147 kN , lo que equivale a una fuerza de 15 toneladas (T) de peso.

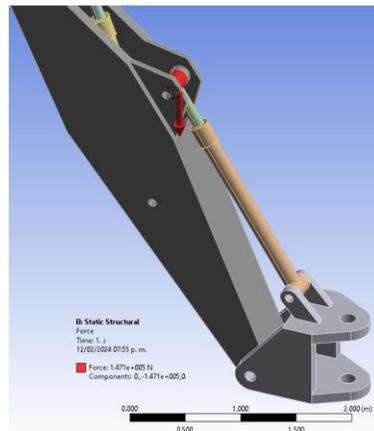


Figura 65 Fuerzas aplicadas en el primer pistón

En el segundo análisis, se crean dos puntos de apoyo fijos; uno en la unión con la pluma y otro en el punto de sujeción del soporte del pistón, específicamente en las áreas de conexión con la pluma, figura 66, y el otro justo en la base de todo el sistema, figura 67, respectivamente.

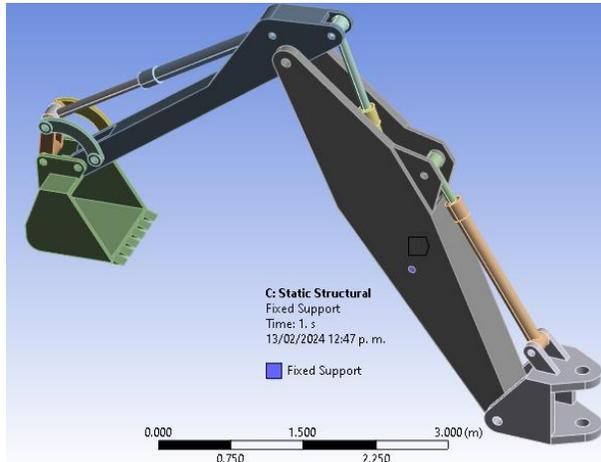


Figura 66 Sujeción del brazo a la pluma mediante el sistema hidráulico

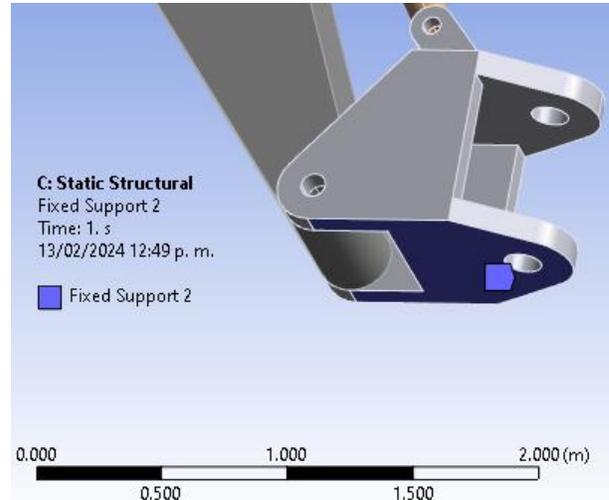


Figura 67 Sujeción en la base de la pluma

La fuerza que aplicaremos se coloca en la punta del pistón hidráulico, que es donde se ejerce la fuerza para su movimiento. Aplicando en este punto una fuerza de 10T, equivalentes a unos 98KN repartiéndose en la dirección de Y, tal como lo podemos ver en la figura 68.

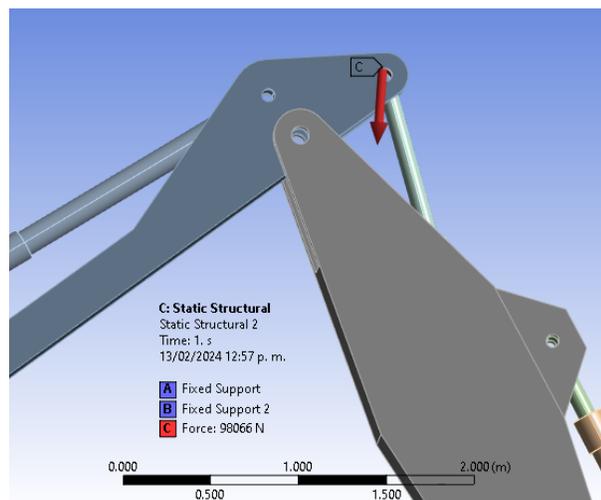


Figura 68 Asignación de fuerza y sujeción para el 2do pistón

En el tercer análisis, se establecieron cuatro puntos de apoyo fijos para mejorar la estabilidad y la eficiencia del sistema. El primero de estos puntos de apoyo (A) se encuentra en la unión entre el pistón hidráulico y el brazo, asegurando una en esta área. El segundo punto de apoyo (C) se sitúa en la conexión del brazo con los tensores, lo que contribuye a distribuir de manera uniforme la carga y minimizar el estrés en el mecanismo. El tercer punto de sujeción (D) se localiza en la unión entre el brazo y la cuchara. Finalmente, el último punto de apoyo se encuentra en la unión entre la pluma y el brazo (E), proporcionando estabilidad adicional y permitiendo un movimiento controlado y preciso. Estos puntos de apoyo se encuentran claramente identificados con letras de asignación en la figura 69, lo que facilita su comprensión y seguimiento dentro del diseño general del sistema.

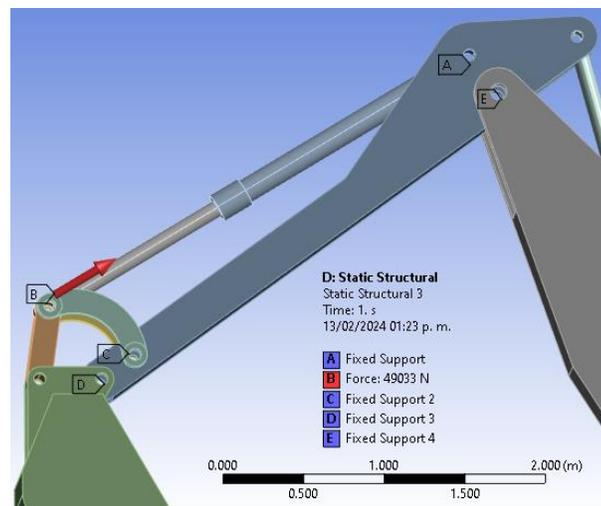


Figura 69 Asignación de puntos fijos en el 3er sistema de análisis estructural

Como se puede observar en la misma figura 69, la fuerza que se aplico es de $49KN$, referentes a $5T$ en la cuchara, que es la necesaria para mover la cuchara y poder realizar los trabajos de la excavación, carga o manipulación del activador que tenga instalado el brazo. Esta fuerza se asigna sobre el pistón en dirección a donde se acciona comúnmente la cuchara. Configuración de los análisis estructurales en el diseño completo.

2.4.2 Configuración de los análisis estructurales solo en la pluma y el brazo

Tras configurar los previos, podemos empezar a trabajar con los recuadros de análisis estructurales. Siendo el primero el que se aplicara en pluma. En los soportes donde se empotra a la base se coloca un “Fixed support”, para determinar que tiene un soporte fijo en ese lugar como se ve en la figura 70.

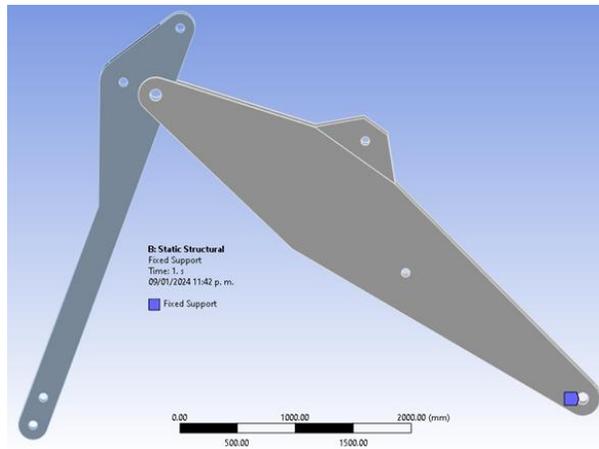


Figura 70 Sujeción del eslabón que va en la base

Solo para reafirmar que las piezas están diseñadas para una carga máxima de 15 T, que en Newtons representan $147099.75N = 147kN$ y las cargas que se aplican son de; $10 T = 98.6kN$ en el vector del eje Y, $5T = 49kN$ en el eje Z, como se vieron en la figura 71.

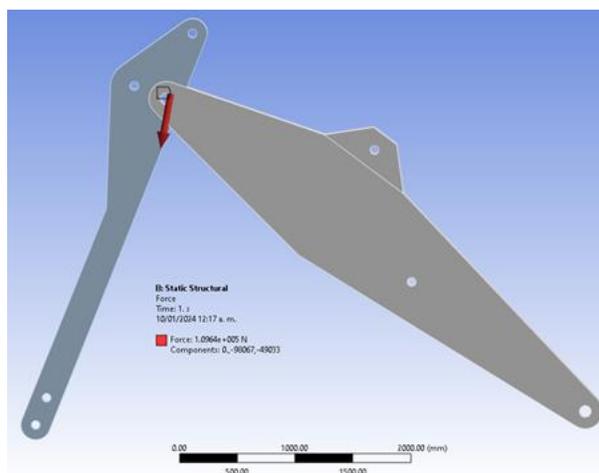


Figura 71 Asignación de fuerzas en la pluma

En el segundo análisis, se crean dos puntos de apoyo fijos: uno en la unión con la pluma y otro en el punto de sujeción del soporte del pistón, específicamente en las áreas de conexión con la pluma, figura 72, y el sistema hidráulico, figura 73, respectivamente.

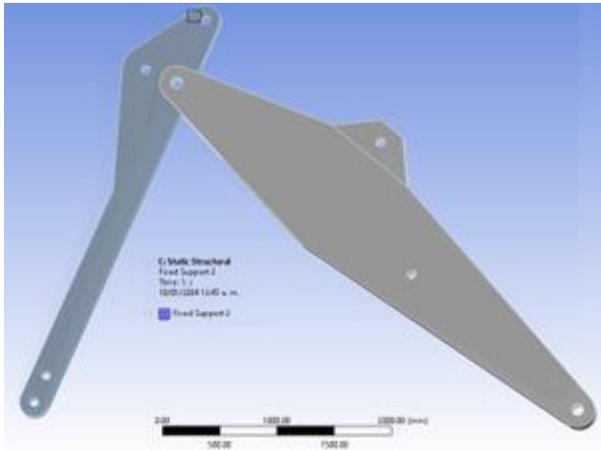


Figura 72 Sujeción del brazo al sistema hidráulico

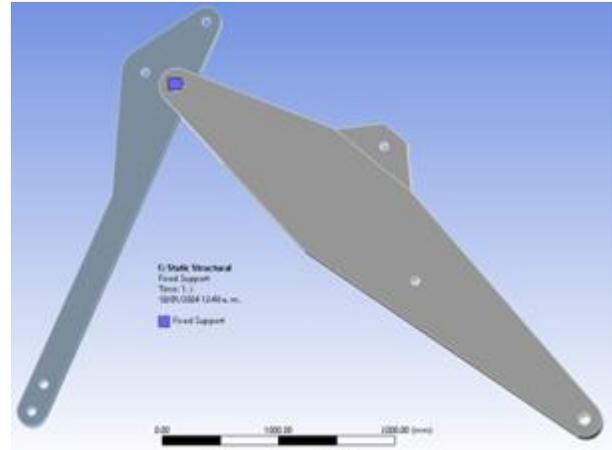


Figura 73 Sujeción del brazo a la pluma

La fuerza que se coloca en la punta del brazo donde suele colocarse la cuchara y/o el activador del brazo que se coloca. Aplicando las 15T repartiéndose en la dirección de Y con 10T y en el eje Z con 5T, como se muestra en la figura 74.

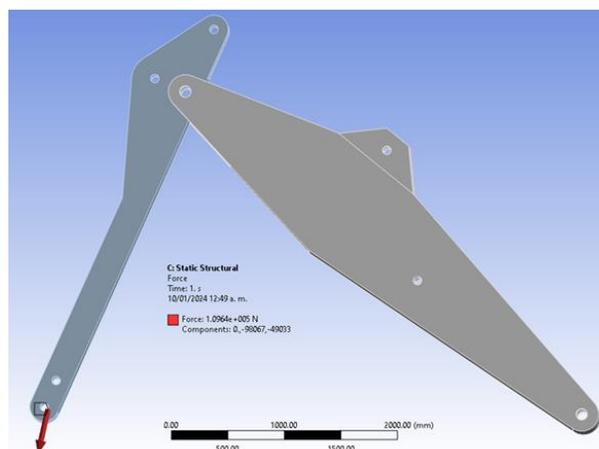


Figura 74 Asignación de fuerzas en el área de trabajo

2.4.3 Configuración para la optimización topológica del diseño completo

Los últimos recuadros corresponden a las “*Structural Optimization*” y su configuración es de suma importancia, pues de no ser las correctas, la OT no podrá ser la adecuada. En la figura 75, donde encontramos las herramientas necesarias para realizar la OT más óptima de las piezas.

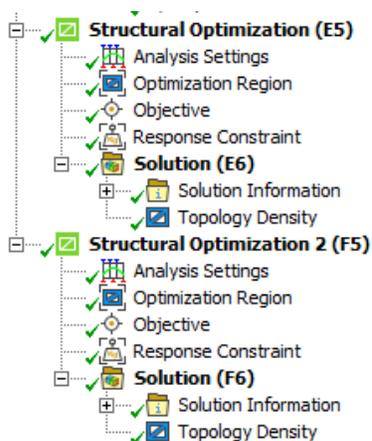


Figura 75 Recuadros para la configuración de la optimización

Para ello debemos asignar las regiones en las cuales se realizará la optimización, en este justo apartado se hará primero la OT del brazo, figura 76 y posteriormente la de la pluma, figura 77.

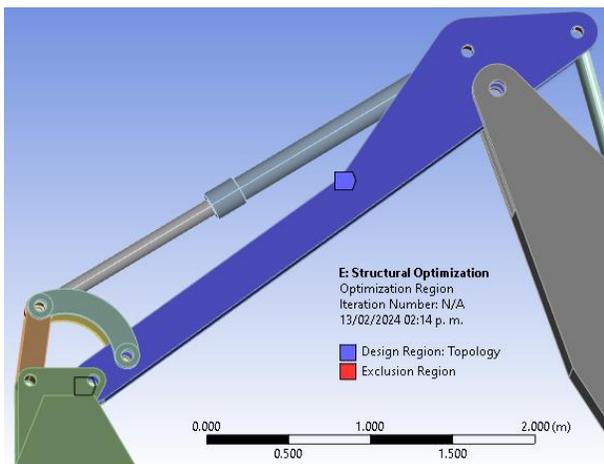


Figura 76 Región para la optimización del brazo

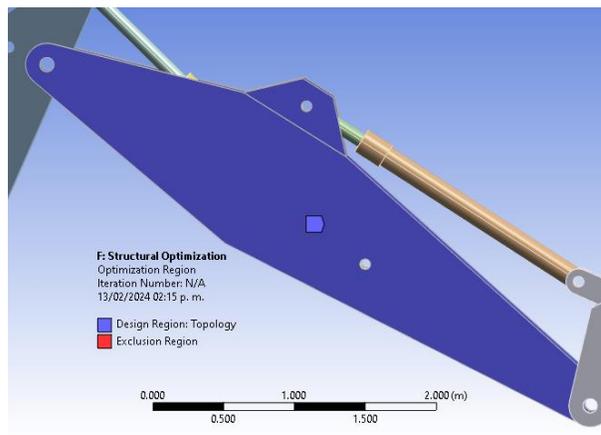


Figura 77 Región para la optimización de la pluma

En los objetivos de ambas optimizaciones se mantendrán los parámetros preestablecidos por el software, vistos en la figura 78, puesto que el mismo tomara en cuentas los 3 análisis previos.

Objective							
Right click on the grid to add, modify and delete a row.							
Enabled	Response Type	Goal	Criterion	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural 3	1	Enabled
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural	1	Enabled
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	N/A	Program Controlled	Static Structural 2	1	Enabled

Figura 78 Objetivo de las optimizaciones

El porcentaje de retención que tendremos de masa en las piezas optimizadas fue asignado en el apartado “Response Constraint”. Donde, para el brazo se encontró una reducción de masa del 15% o, como se puede ver en la figura 79, se tiene un 85% de masa de restricción a la respuesta del objetivo.

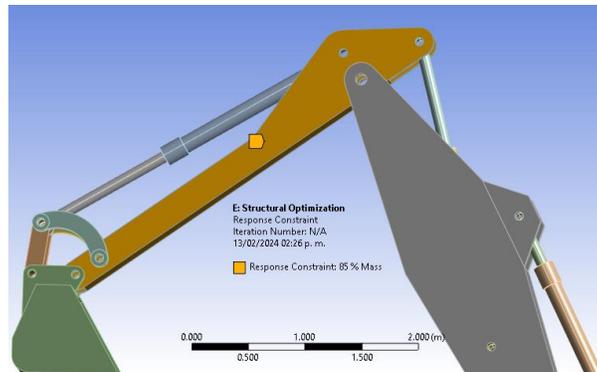


Figura 79 Asignación del 85% de masa

Y para la pluma tener una reducción de masa del 62% o, como se puede ver en la figura 80, se tiene un 38% de masa de restricción.

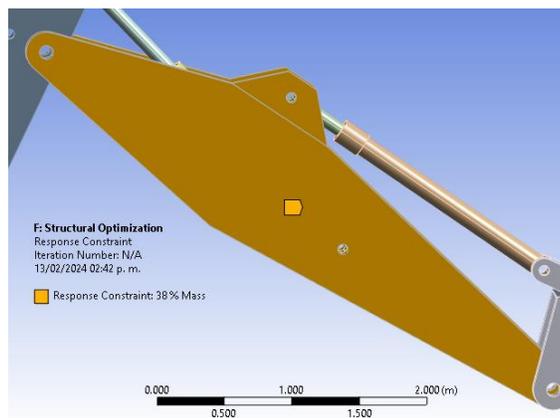


Figura 80 Asignación del 38% de masa

2.4.4 Configuración para la optimización topológica en la pluma y el brazo

Siguiendo con el recuadro de “Structural Optimization”, asignamos con la región de Optimización, que, como se puede ver en la figura 81, son ambas piezas de la pluma y brazo.

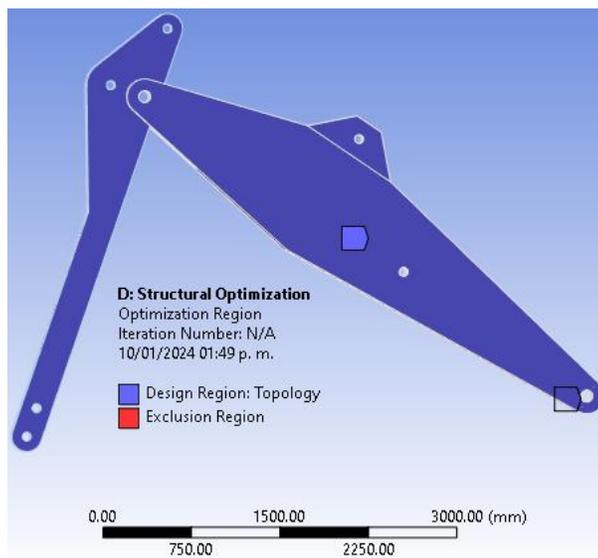


Figura 81 Región de ambas piezas optimizadas

Como en esta simulación la configuración de la geometría es a todos los cuerpos, se prueba una optimización basada en la densidad de las bases, como se muestra en la figura 82, esto nos ayudará a tener una OT más eficiente para las cargas en las que se verá sometida el brazo.

Details of "Optimization Region"	
Design Region	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Exclusion Region	
Define By	Boundary Condition
Boundary Condition	All Boundary Conditions
Definition	
Suppressed	No
Optimization Option	
Optimization Type	Topology Optimization - Density Based

Figura 82 Definición en el tipo de optimización

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSION

Para iniciar la configuración destinada a visualizar las deformaciones que experimentará el brazo en los análisis estático-estructurales, nos dirigimos a cada cuadro correspondiente en la sección de la solución. En la barra de herramientas, representada en la figura 83, podremos encontrar una variedad de resultados disponibles para su visualización. En este caso, nos enfocaremos en la parte de deformación, seleccionando específicamente el primer recuadro que muestra la deformación total.



Figura 83 Barra de resultados

Este proceso nos permitirá observar como el brazo se deforma bajo las cargas aplicadas, lo que ayuda a evaluar su comportamiento estructural de la deformación total brindando una representación de cómo se verá afectada la geometría del brazo en diferentes puntos, lo que facilitará la identificación de áreas críticas que requieran ajustes o refuerzos en el diseño. Y solo para completar el comportamiento y tener mejores visualizaciones de la deformación, se agregaron las deformaciones de "Volumen" y la "Deformación Elástica Equivalente", esto para tener una medida de la deformación total que experimenta la estructura bajo la carga, considerando únicamente la parte elástica de dicha deformación. Teniendo como configuración en cada análisis la figura 84.

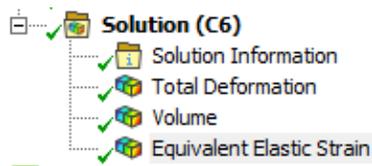


Figura 84 Configuración para la solución de los análisis estáticos

3.1 Análisis en los casos de carga

La primera pieza que mostraremos su deformación son las piezas utilizadas en el análisis de los “Soportes en casos de carga”, donde, se puede ver las marcas con más estrés en un tono más rojizo, mientras que los tonos azules y claros representan menos estrés en la pieza. Y la representación de las piezas se puede ver en las figuras 85, 86 y 87.

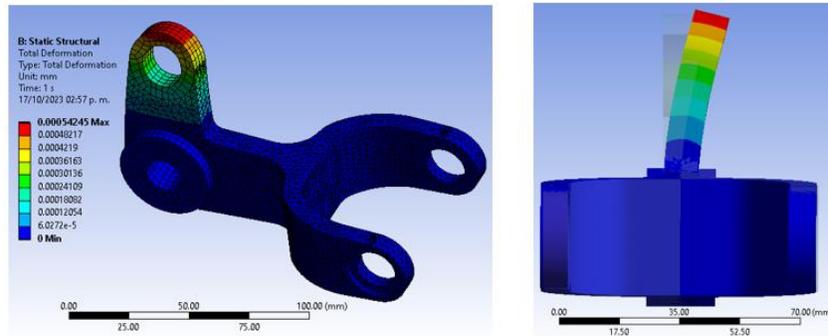


Figura 85 Deformación del primer caso de carga

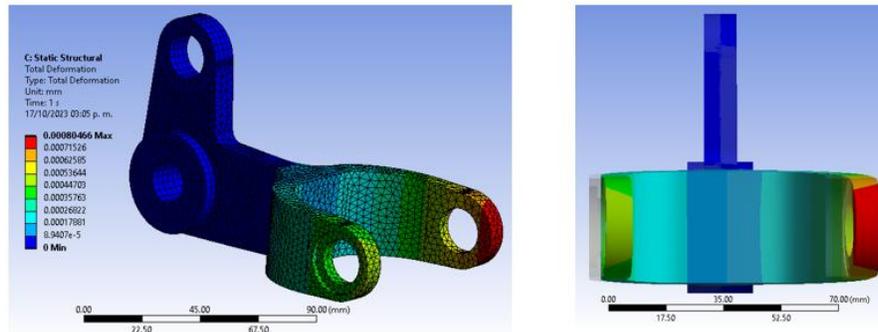


Figura 86 Deformación del segundo caso de carga

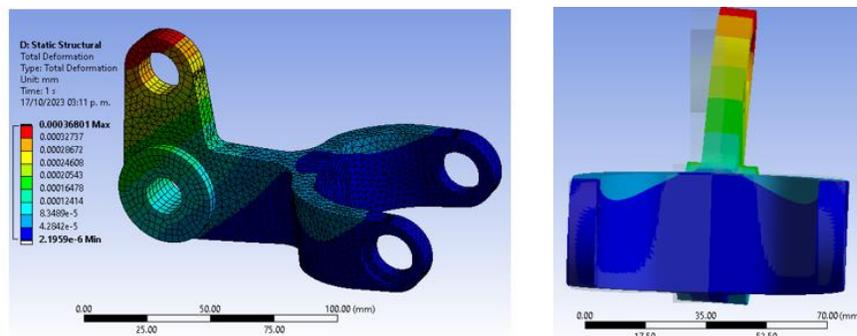


Figura 87 Deformación del tercer caso de carga

3.2 Análisis estructurales del diseño completo

En este apartado, se llevarán a cabo los análisis correspondientes a la simulación de los componentes de la excavadora. El objetivo principal es demostrar cómo estas simulaciones son capaces de representar los movimientos que suelen presentar estas máquinas en condiciones operativas. Es importante tener en cuenta que los componentes de una excavadora son piezas dinámicas, por lo tanto, es crucial simular con precisión las fuerzas aplicadas sobre ellos. Estas fuerzas se asemejan a las capacidades máximas de la excavadora, permitiendo abarcar un amplio rango de trabajo y obtener así la mejor optimización posible del diseño.

Al replicar las condiciones reales de funcionamiento de la excavadora, estas simulaciones nos proporcionarán una comprensión más profunda de cómo se comportan los componentes en situaciones prácticas. Esto nos permitirá identificar posibles áreas de mejora en el diseño y optimizar el rendimiento de la excavadora en términos de eficiencia, seguridad y durabilidad.

3.2.1 Primer caso de análisis

En este análisis inicial, podemos comenzar por explorar la visualización de los elementos, donde la pieza original se representa mediante una sombra sutil que acompaña a la pieza en movimiento. La figura 88 muestra una gradación de colores que denota la intensidad de las deformaciones, siendo los tonos rojos y vibrantes indicativos de deformaciones más notorias y evidentes, particularmente visibles en el área de la cuchara. Por el contrario, los tonos azules, más suaves, sugieren deformaciones de menor magnitud. Estos colores delimitan las zonas donde se aplicaron los soportes en la configuración de la simulación.

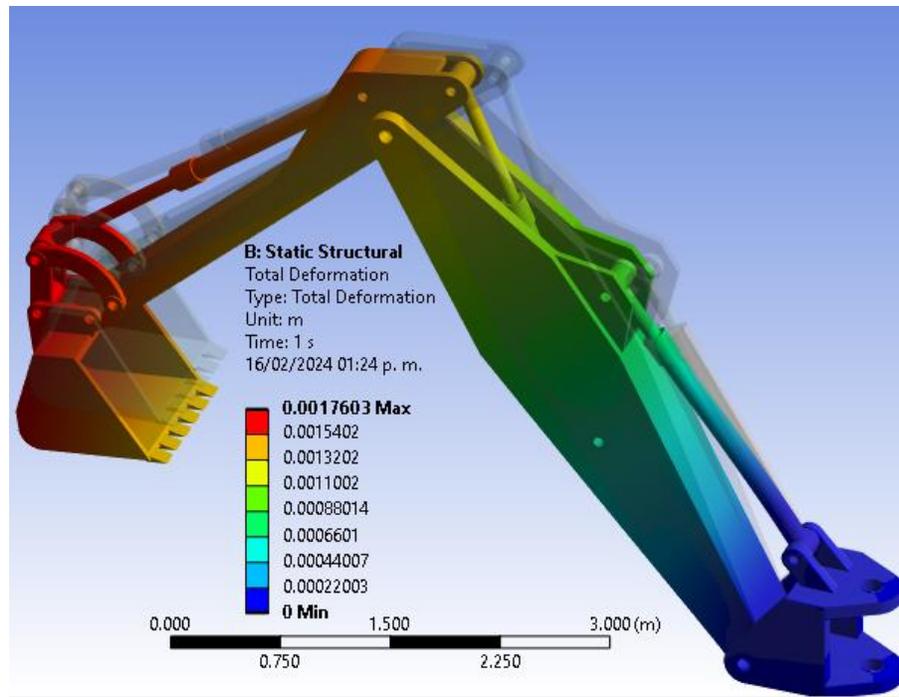


Figura 88 Resultados del primer análisis estático

En cuanto a las deformaciones máximas, expresadas en unidades de metros (m), estas varían desde $1.1 \times 10^{-3} m$ hasta $1.7 \times 10^{-3} m$, mientras que las deformaciones mínimas oscilan entre $0.66 \times 10^{-3} m$ y tan solo $0.22 \times 10^{-3} m$. Es importante considerar estos valores para comprender la magnitud y la distribución de las deformaciones a lo largo de la pieza y su implicancia en el diseño y la funcionalidad del objeto en cuestión.

3.2.2 Análisis del segundo caso

En la figura 89 del segundo caso, se observa un mayor nivel de movimiento en la parte del brazo, evidenciado por la presencia de colores más intensos en los componentes, con valores que oscilan desde $9.81 \times 10^{-5} m$ hasta una deformación máxima de $1.47 \times 10^{-4} m$. Sin embargo, también se detecta una deformación significativa en la parte de la pluma, especialmente en el punto de unión con el primer pistón, donde predominan colores más tenues.

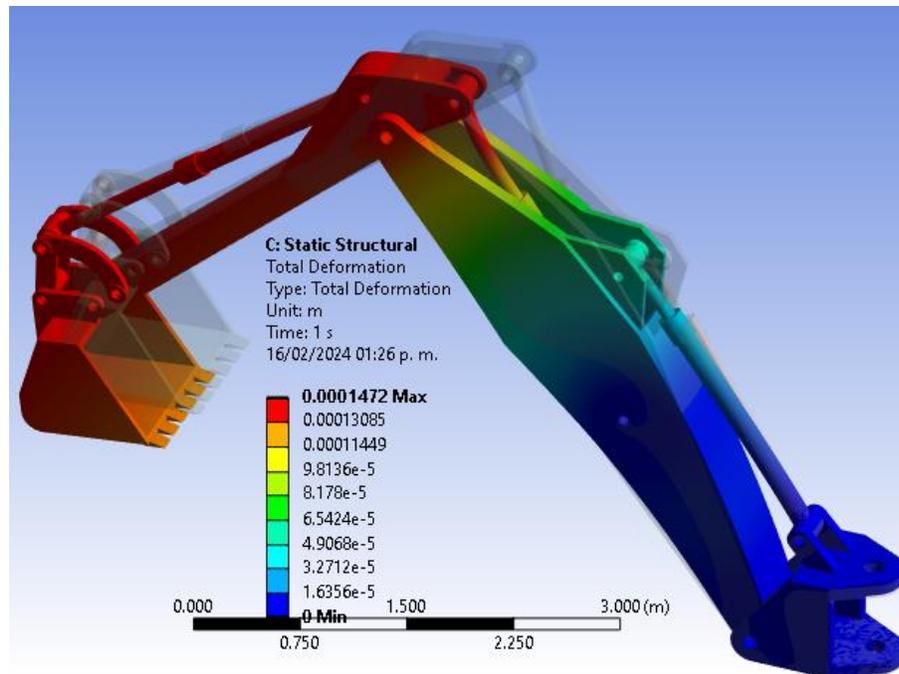


Figura 89 Segundo análisis estático

Aquí, las deformaciones varían desde $6.54 \times 10^{-5} m$ hasta un mínimo de $1.63 \times 10^{-5} m$. Es importante destacar que, aunque las deformaciones en el brazo son más pronunciadas, las presentes en la pluma no deben pasarse por alto, ya que podrían afectar la funcionalidad y la estabilidad del conjunto.

3.2.3 Análisis del tercer caso

En el último análisis de la figura 90, se aprecia el movimiento de la cuchara, específicamente, parece estar siendo levantada. La deformación asociada a este movimiento se hace más evidente en los dientes de la cuchara, los cuales son fundamentales para la recolección y excavación de materiales. En cuanto al resto de los componentes, se observa una deformación mínima que varía entre $9.08 \times 10^{-6} m$ y $3.63 \times 10^{-5} m$.

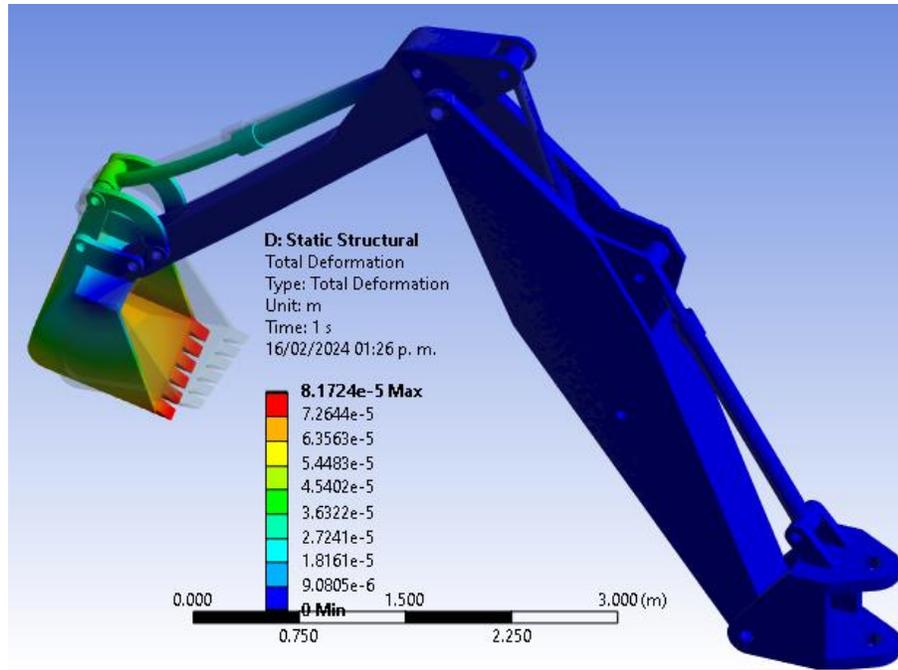


Figura 90 Tercer caso de análisis

Estos análisis detallados del movimiento de los componentes nos proporcionan una base para realizar optimizaciones en el diseño. Es crucial entender cómo se comportan los diferentes elementos bajo carga y movimiento para poder realizar ajustes que mejoren la eficiencia y la durabilidad del sistema. Al comprender las áreas de mayor deformación y los puntos críticos, podemos trabajar en soluciones que minimicen el desgaste y maximicen el rendimiento general del equipo.

3.3 Análisis estructurales de la pluma y brazo

Comenzando con los resultados de los esfuerzos, el primero al que sometimos de la pluma, contamos con una deformación máxima de 9.67 mm , viendo que se muestra de color rojo en la escala de deformación, pero con un promedio de 3.22 mm ah 6.44 mm de deformidad, como se puede observar en la figura 91.

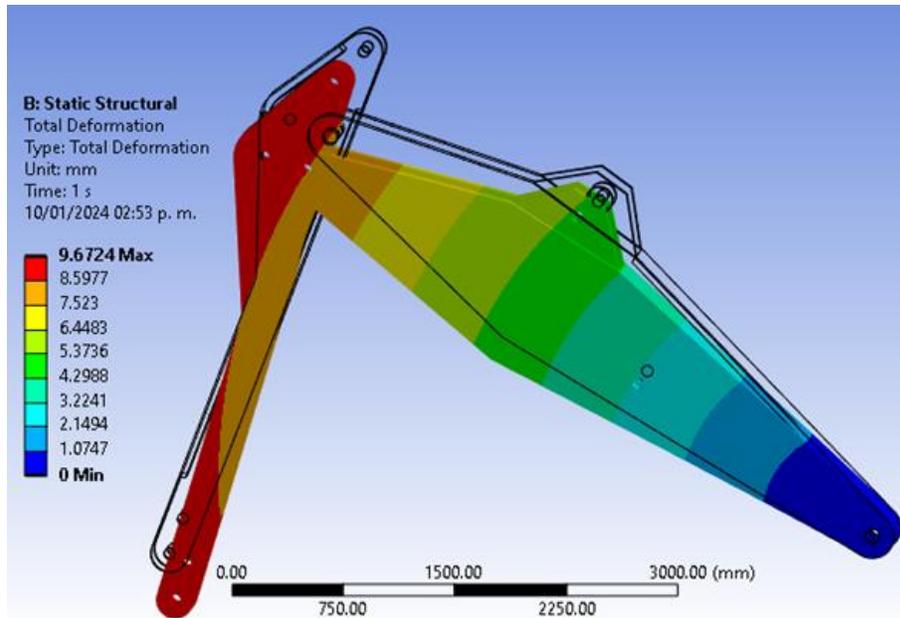


Figura 91 Deformación de pluma

Esto se puede reflejar o interpretar al movimiento de carga y descarga que genera el brazo, pues recordemos que el brazo es una pieza dinámica que responde la carga conforme al tiempo, pero esto fue tomado en cuenta al generar las fuerzas, pues se utilizaron su máxima capacidad.

Y nuestra segunda deformación, se simula el movimiento, carga y peso de la cuchara o activador que pueda utilizar la excavadora, es por eso por lo que cuenta con un movimiento más sutil y una menos deformidad. En la figura 92, tenemos una máxima de 2 mm y una promedia de 0.92 mm hasta 1.16 mm de movimiento.

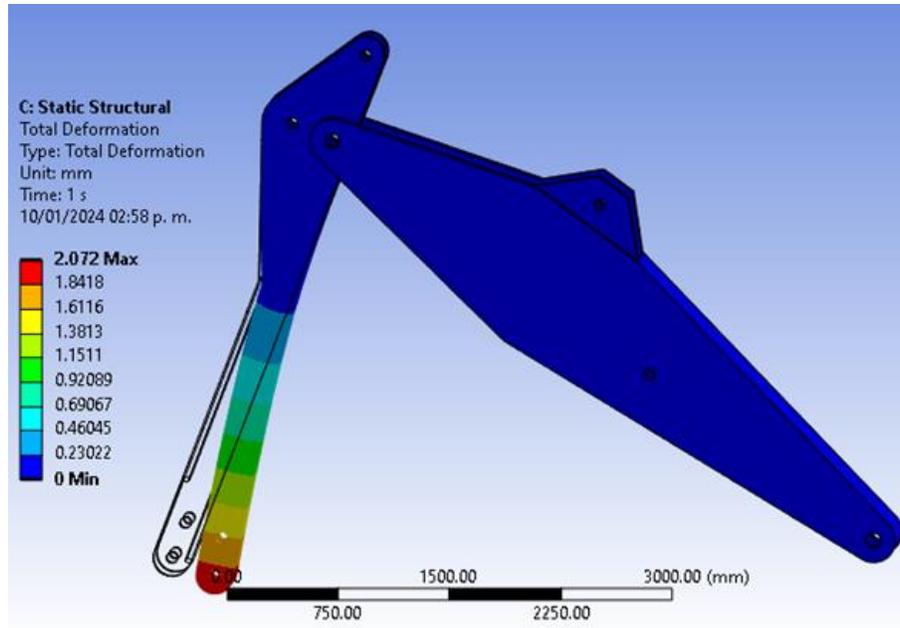


Figura 92 Deformación de Brazo

3.4 Optimización topológica en las piezas a la introducción de ANSYS

3.4.1 Optimización de la repisa

Se procederá a analizar la optimización geométrica de la pieza denominada "Repisa", tal como se muestra en la figura 93. Se detalla la geometría de un solo cuerpo con el fin de determinar las dimensiones más adecuado para su posible fabricación.

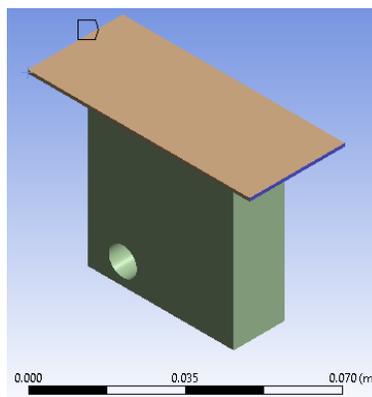


Figura 93 Pieza repisa para la OT

La optimización de la región se llevará a cabo con un objetivo de retención del 110 %, lo que implica que se buscará optimizar la forma de la pieza para garantizar que pueda soportar un sobredimensionamiento del 10 % con respecto a las cargas esperadas. La figura 94 correspondiente a la pieza en cuestión.

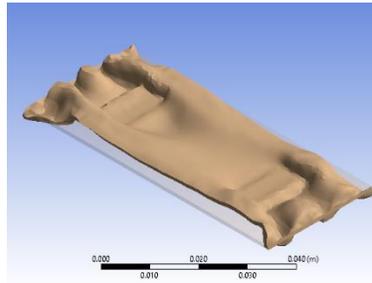


Figura 94 Optimización de la base para la repisa

Por otro lado, para la optimización del soporte, se seguirán los mismos pasos que en el caso de la pieza principal, pero con enfoque en el diseño del soporte. En este caso, se establecerá una restricción del 25 %, lo que significa que se buscará optimizar el soporte para que pueda resistir hasta un 25 % más de carga de lo previsto inicialmente, como se puede apreciar en la figura 95.

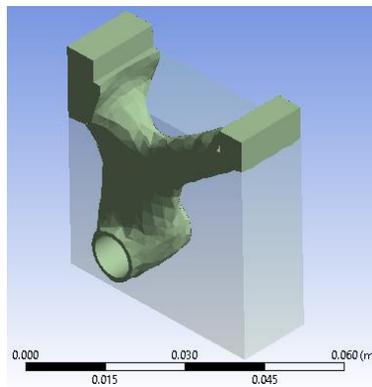


Figura 95 Optimización del soporte

Con estos parámetros y consideraciones, se obtuvo el diseño optimizado de la pieza, la cual se muestra en la figura 96. Y al final el mismo Software nos dice los resultados a la optimización, Teniendo su volumen y masa tanto inicial como final, las cuales se pueden comparar en las figuras 97 y 98.

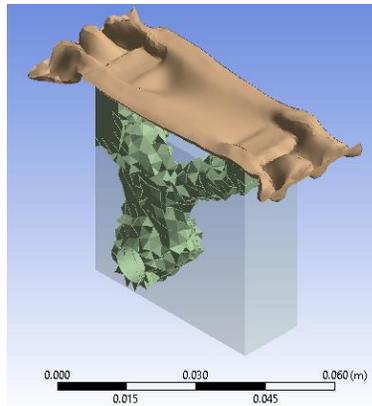


Figura 96 Repisa optimizada

Results	
Minimum	1.
Maximum	1.
Average	1.
Original Volume	2.1e-006 m ³
Final Volume	2.3033e-006 m ³
Percent Volume of Original	109.68
Original Mass	1.6485e-002 kg
Final Mass	1.8081e-002 kg
Percent Mass of Original	109.68
Information	
Iteration Number	42

Figura 97 Resultado de la optimización en base

Results	
Minimum	1.e-006
Maximum	1.
Average	0.25996
Original Volume	3.2992e-005 m ³
Final Volume	8.1347e-006 m ³
Percent Volume of Original	24.657
Original Mass	0.25899 kg
Final Mass	6.3857e-002 kg
Percent Mass of Original	24.657
Information	
Iteration Number	42

Figura 98 Resultado de la optimización el soporte

En los resultados obtenidos tras el proceso de optimización, hemos observado que la parte del soporte inicialmente poseía un volumen de $2.1 \times 10^{-6} m^3$, incrementándose luego a $2.3 \times 10^{-6} m^3$. Este aumento del 10 % en el volumen del soporte se justifica por la necesidad de proporcionar un sustento adicional para asegurar un mejor rendimiento de la pieza.

Por otro lado, durante el proceso de optimización del soporte, se ha logrado una reducción significativa en su volumen. Inicialmente, el soporte tenía un volumen de $3.3 \times 10^{-5} m^3$, disminuyendo posteriormente a un volumen final de $8.13 \times 10^{-6} m^3$. Esta reducción del 25 % en el volumen del soporte se ha logrado mediante la aplicación de técnicas de optimización, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del diseño sin comprometer su funcionalidad ni su capacidad de soporte.

3.4.2 Optimización en los casos de carga

El software de optimización nos proporciona un análisis detallado con una configuración de masa del 70 %, como se muestra en la figura 99. Observamos cómo la pieza enfoca su diseño en las zonas donde se espera una mayor carga, manteniendo al mismo tiempo la masa total y la integridad de las uniones entre componentes.

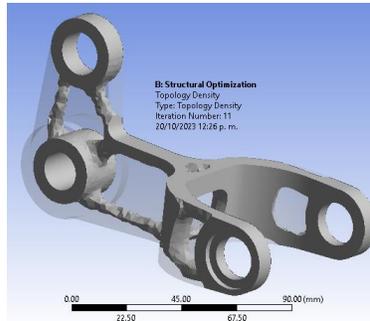


Figura 99 Optimización del caso de cargas

En la figura 100, podemos apreciar una reducción tanto en el volumen como en la masa de la pieza. Al centrarnos en la masa, partimos de una masa inicial de " 0.7 kg ", la cual se reduce significativamente a " 0.23 kg " en el diseño optimizado. Esta reducción del 70% demuestra las estrategias de optimización aplicadas, permitiendo una pieza más ligera sin comprometer su resistencia ni su funcionalidad.

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.26463
Original Volume	$8.9212\text{e-}005 \text{ m}^3$
Final Volume	$3.035\text{e-}005 \text{ m}^3$
Percent Volume of Original	34.02
Original Mass	0.70031 kg
Final Mass	0.23825 kg
Percent Mass of Original	34.02

Figura 100 Resultados de la optimización

3.4.3 Optimización por capas

Tras completar la simulación, hemos obtenido los resultados de la optimización que se muestran en la figura. El método "Level Set" ha producido una geometría topológica más uniforme. Sin embargo, la suavidad de la geometría final está directamente relacionada con el tamaño de la malla original. En este caso particular, se ha optado por un tamaño de malla grueso para minimizar los tiempos de cálculo. No obstante, si se desea una geometría más precisa para validar el diseño, se recomienda reducir el tamaño de la malla. Esto permitirá una representación más precisa de la geometría y potencialmente mejorar la calidad de los resultados obtenidos.

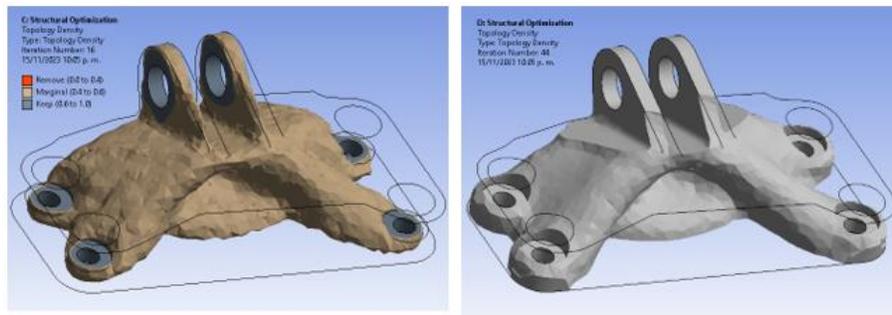


Figura 101 Diferencia entre la optimización por capas y por densidad

3.5 Optimización topológica del brazo completo

Dentro de la OT, se llevaron a cabo pruebas de carga con diferentes porcentajes para comprender el comportamiento de las fuerzas aplicadas y, en última instancia, determinar el porcentaje ideal que cumpla con los requisitos deseados. A continuación, presentaremos las optimizaciones resultantes de las dos configuraciones analizadas, comenzando con las optimizaciones de los diseños completos y luego enfocándonos específicamente en la pluma y el brazo.

Este enfoque permitirá una comprensión más holística del rendimiento del sistema, ya que nos centraremos tanto en la estructura global como en sus componentes individuales clave. Al evaluar las optimizaciones en ambos niveles, podremos identificar áreas de mejora tanto a nivel macro como micro, lo que nos ayudará a perfeccionar el diseño para alcanzar los objetivos deseados en términos de resistencia, eficiencia y durabilidad.

3.5.1 Optimización topológica de la pluma al 38%

En la figura 102, se presenta el primer diseño resultante de la optimización topológica, el cual conserva solamente el 38% de la masa original del diseño robusto. Al igual que en los análisis de deformación, en esta representación también podemos observar la pieza robusta de manera sombreada en la parte posterior de la pieza optimizada.

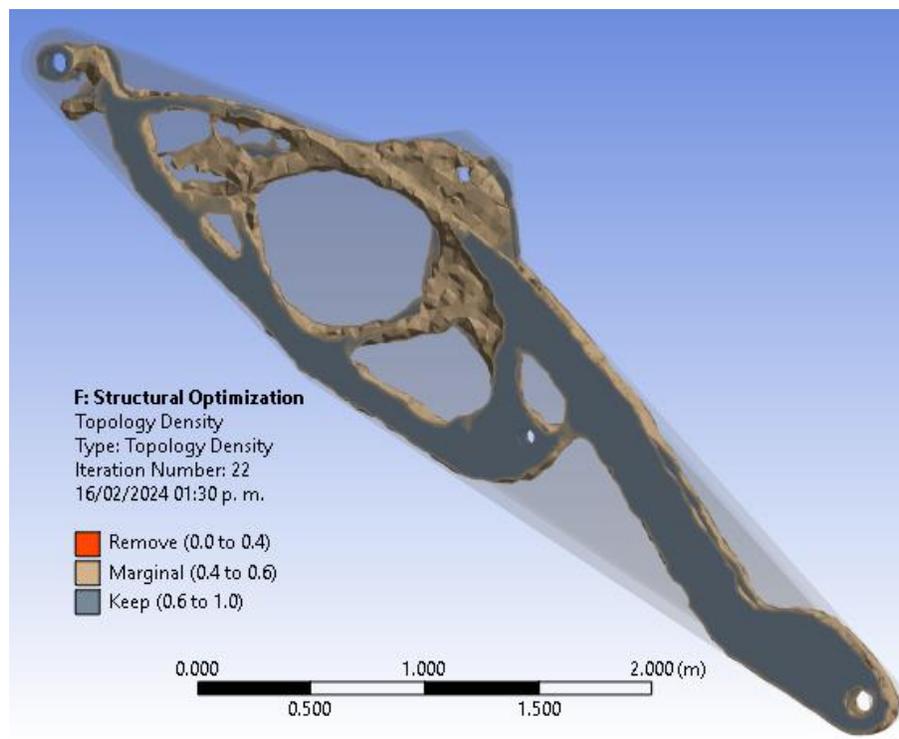


Figura 102 Optimización de la pluma al 38%

En la figura 103, se muestra una tabla generada por el software que permite comparar los datos iniciales y finales de la pieza optimizada.

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.349
Original Volume	0.74652 m ³
Final Volume	0.27366 m ³
Percent Volume of Original	36.658
Original Mass	5860.2 kg
Final Mass	2148.3 kg
Percent Mass of Original	36.658

Figura 103 Resultados en la optimización de la pluma

En esta tabla, se observa que todos los datos muestran una discrepancia del 38%, que corresponde al porcentaje de reducción aplicado en la optimización. Por ejemplo, el volumen inicial de la pieza era de aproximadamente $0.182m^3$, mientras que el volumen final resultante es de $0.131m^3$, lo que representa una disminución significativa. Además, se destaca la reducción en masa, pasando de 5.86 toneladas en el diseño original a 2.15 tonelada en la versión final. Estos datos resaltan los impactos positivos de la optimización en términos de eficiencia y economía de material.

3.5.2 Optimización topológica del brazo al 85%

En este apartado se presentan los resultados de la optimización del brazo. A diferencia de la pluma, este diseño conserva el 85% de su masa original. Esta diferencia se debe a que el brazo cuenta con más puntos de sujeción, los cuales deben mantenerse robustos para evitar posibles rupturas o fisuras cuando las piezas están en funcionamiento.

La decisión de conservar un porcentaje mayor de la masa original del brazo se basa en la necesidad de mantener la rigidez y la resistencia estructural en áreas críticas donde se aplican cargas significativas. Estos puntos de sujeción actúan como puntos de apoyo clave para el brazo, por lo que es fundamental preservar su integridad para garantizar un rendimiento seguro y confiable durante su uso en operaciones reales.

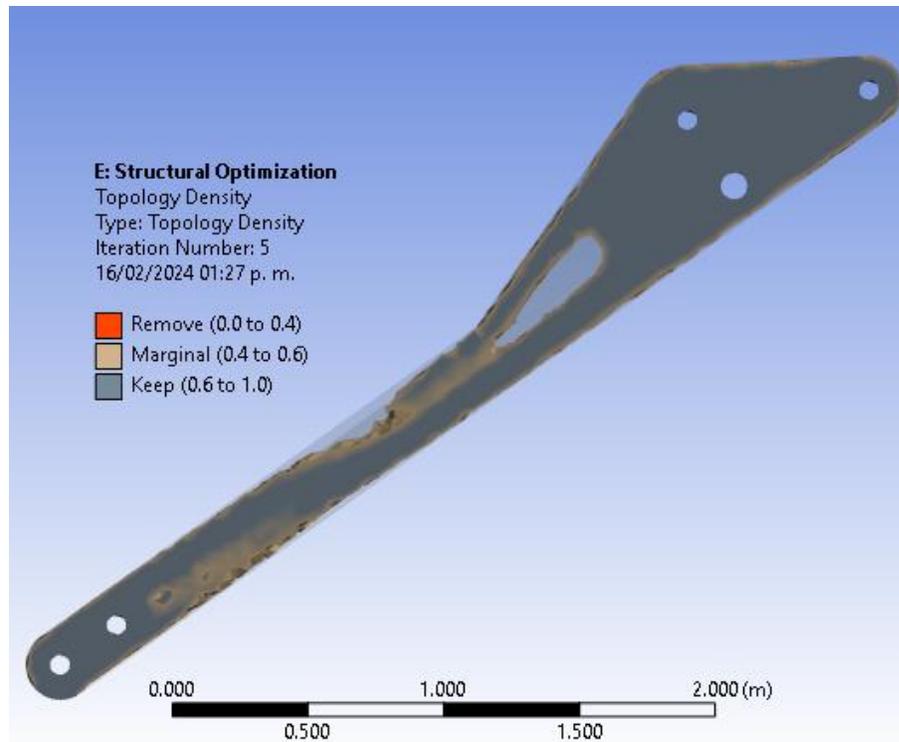


Figura 104 Optimización del brazo al 85%

Como se puede apreciar en la figura 105, una vez más se observa la reducción de parámetros de acuerdo con el porcentaje establecido para la optimización. Partiendo de una masa original de 1.5 toneladas, se logra alcanzar un mínimo de 1 tonelada. Al sumar los valores anteriores, podemos constatar que el peso total del sistema inicialmente superaba las 7.2 toneladas, para luego culminar en un peso de 3.17 toneladas. Esto representa una reducción total, aproximada del 45% entre ambas piezas.

Results	
Minimum	3.3881e-002
Maximum	1.
Average	0.6383
Original Volume	0.18264 m ³
Final Volume	0.13142 m ³
Percent Volume of Original	71.954
Original Mass	1433.8 kg
Final Mass	1031.6 kg
Percent Mass of Original	71.954

Figura 105 Resultados de la optimización de brazo

3.6 Optimización topológica de la pluma y el brazo

3.6.1 Optimización topológica al 25%

En la figura 106 se puede apreciar la representación de las piezas tras un proceso de optimización topológica, en el cual se ha reducido su masa a solo un 25 % de su valor original. Esta drástica disminución en la masa conlleva a una estructura que se muestra abstracta y con voladizos que, lamentablemente, carecen de la robustez necesaria para su uso práctico en campo. Es evidente que esta opción técnica queda descartada en términos de funcionalidad, sin embargo, resulta valiosa para comprender el comportamiento del software frente a las fuerzas aplicadas durante la optimización.

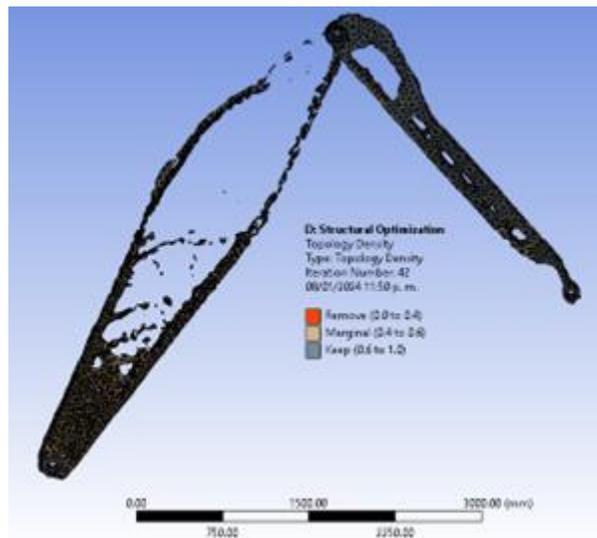


Figura 106 Optimización Topológica 25 %

Es importante considerar otros factores, como la reducción del material, al evaluar esta técnica. Aunque se logra una notable reducción en el consumo de material, la distribución resultante no es óptima, lo que impacta negativamente en el rendimiento general del diseño. Este efecto se refleja en la disminución significativa de otros aspectos clave, como la resistencia estructural y la eficiencia operativa.

Pero lo que se puede rescatar de esta opción es que proporciona información valiosa sobre el potencial del software en términos de reducción de masa, queda claro que se deben considerar ajustes adicionales para garantizar un diseño final que cumpla con los estándares de seguridad y rendimiento deseados.

3.6.2 Optimización topológica al 50%

La figura 107 muestra que las piezas han sido optimizadas para tener solo el 50 % de su masa original. En comparación con la iteración anterior, esta opción presenta una superficie externa mejorada, con mayor robustez y capas visibles que sugieren una mayor resistencia a las fuerzas a las que fue sometida. Sin embargo, a pesar de estas mejoras en la apariencia superficial, la estructura interna de la pieza se muestra difusa. Esto plantea problemas en términos de fabricación, ya que la complejidad de la geometría dificultaría su producción. Por lo tanto, esta opción no resulta viable para su implementación.

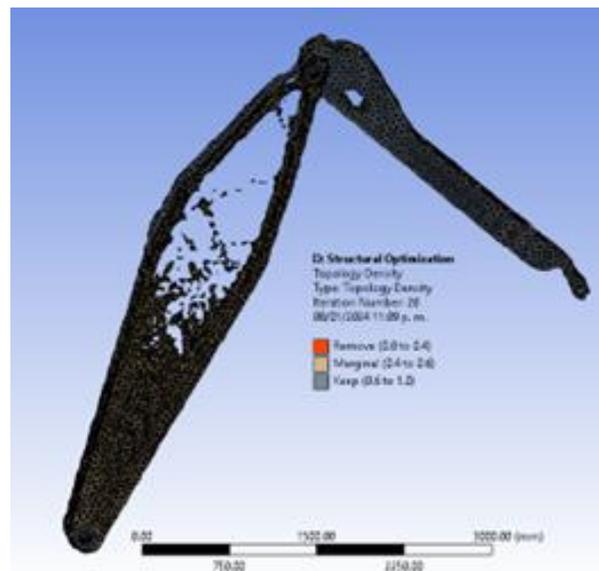


Figura 107 Optimización Topológica 50 %

Aunque se han realizado mejoras en la reducción y distribución del material en comparación con la opción anterior, esta versión todavía no cumple con los estándares necesarios para ser considerada adecuada para su uso en campo.

3.6.3 Optimización topológica al 75%

Esta OT se muestra más resistente, puesto que su índice de masa igual es mayor conservando el 75 % de la misma, figura 108. Claramente esta OT puede llegar hacer más apta para su aplicación en campo, pero gracias al software y las configuraciones que hicimos previamente podemos seguir buscando un porcentaje más óptimo como el que optemos en la última simulación.



Figura 108 Optimización Topológica 75 %

3.6.4 Optimización topológica al 58%

La OT más óptima a la que se pudo llegar fue reduciendo la masa en un 58 % como se muestra en la figura 109, pues bajo los criterios que hemos evaluado las optimizaciones anteriores, basándonos en la figura tenemos que;



Figura 109 Optimización Topológica 58 %

La Optimización ha resultado en una significativa reducción del volumen, como se puede ver la figura 110 pasamos de 0.929 m^3 a 0.481 m^3 . Esta reducción se ha traducido también en una disminución considerable de la masa total, descendiendo de **7.3 toneladas** a **3.8 toneladas**. Estos cambios no solo representan un avance en términos de eficiencia operativa, sino que también contribuyen al ahorro de combustible durante el funcionamiento de la excavadora.

Además de los beneficios en términos de reducción de masa y volumen, la OT nos ha brindado la capacidad de identificar áreas críticas y no críticas en el brazo de la excavadora. La distribución del material se ha ajustado de manera inteligente para concentrarse en las zonas de carga máxima, lo que ha mejorado significativamente la resistencia estructural donde más se necesita. Este enfoque permite una utilización más eficaz de los recursos y garantiza un rendimiento óptimo del brazo de la excavadora en condiciones de trabajo exigentes.

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.41819
Original Volume	0.92917 m ³
Final Volume	0.48418 m ³
Percent Volume of Original	52.109
Original Mass	7294. kg
Final Mass	3800.8 kg
Percent Mass of Original	52.109

Figura 110 Resultados iniciales y finales de la optimización completa del brazo

3.7 Comparación de optimizaciones

3.7.1 Comparación en la optimización del brazo

En el último apartado, analizaremos todas las optimizaciones propuestas para determinar cuál de ellas es la más idónea para su implementación en el campo. En el análisis se comprenderá de una comparación en los aspectos clave como resistencia, rendimiento, peso, deformación, eficiencia estructural, ahorro de material, entre otros. Se evaluarán los cuatro diseños finales obtenidos, se llevará a cabo una comparativa detallada para finalmente determinar la configuración óptima. Comenzaremos examinando la primera configuración del brazo, que se muestra en la figura 111."

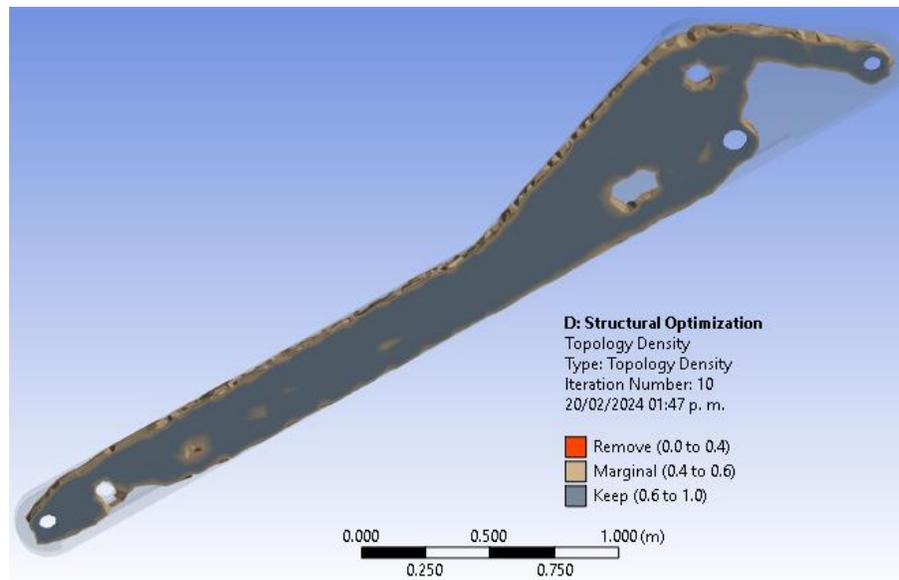


Figura 111 Primer caso en la optimización del brazo

Las características de esta pieza se pueden ver en la figura 112, donde se puede destacar la reducción en la masa, pasando de su valor original de 1433.8 kg a casi 950 kg en su masa final. Esta reducción en la masa es un aspecto para considerar para su aplicación. Asimismo, el volumen de la pieza también experimenta una reducción notable del 34%, lo que refleja una eficiencia adicional en términos de espacio y material.

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.45852
Original Volume	0.18264 m ³
Final Volume	0.12051 m ³
Percent Volume of Original	65.981
Original Mass	1433.8 kg
Final Mass	946. kg
Percent Mass of Original	65.981

Figura 112 Resultados de la primera optimización del brazo

Todos estos datos surgen con los parámetros predefinidos y las restricciones establecidas previamente. Esto se logra gracias a las iteraciones y algoritmos implementados en el software, que permiten comparar y contrastar esta propuesta de optimización con otras alternativas, como la que podemos ver en la figura 113. Esta nueva pieza es el otro posible resultado que obtuvimos al simular el brazo con todos los componentes.

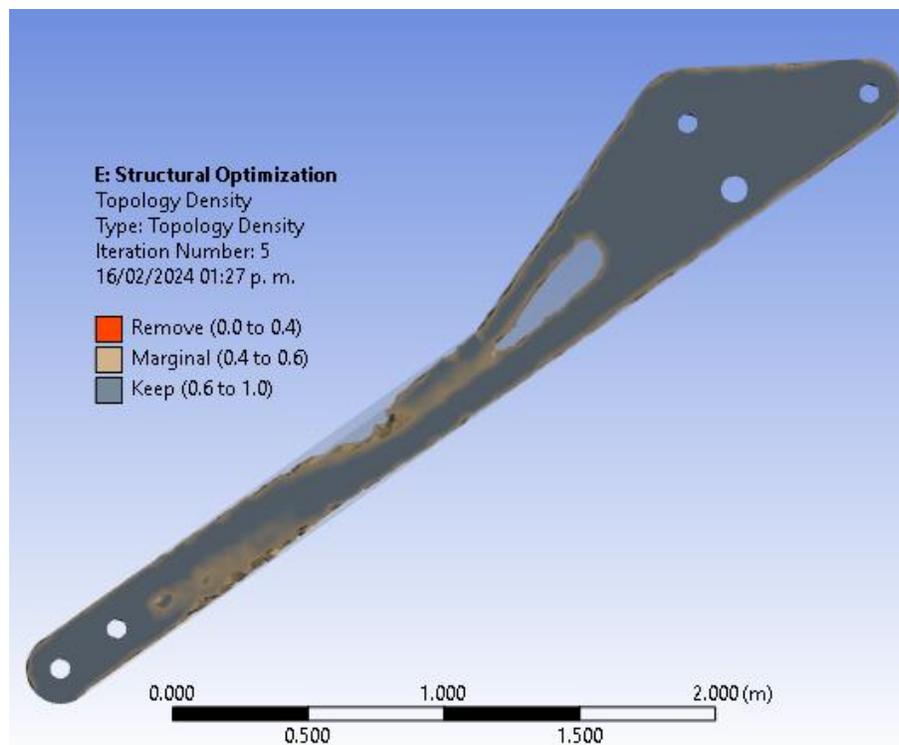


Figura 113 Segunda optimización del brazo

En la figura 113, podemos observar una geometría más estable y uniforme en comparación con la versión anterior. En este nuevo diseño, los eslabones destinados a la conexión de los componentes muestran menos modificaciones, lo que sugiere una mayor cohesión y eficiencia en la estructura general.

Results	
Minimum	3.3881e-002
Maximum	1.
Average	0.6383
Original Volume	0.18264 m ³
Final Volume	0.13142 m ³
Percent Volume of Original	71.954
Original Mass	1433.8 kg
Final Mass	1031.6 kg
Percent Mass of Original	71.954

Figura 114 Resultados de la segunda optimización del brazo

La figura 114 presenta los resultados obtenidos en el segundo diseño, manteniendo la misma masa inicial como punto de referencia. En este caso, se logra una reducción del 28% en las características del componente, alcanzando una masa final ligeramente superior a una tonelada, concretamente de 1031.6 kg. Sin embargo, lo más destacable es la mejora en la geometría, la cual es esencial si se considera la manufacturación de la pieza.

Estos resultados subrayan la importancia de no solo reducir la masa, sino también de optimizar la geometría para facilitar el proceso de fabricación y garantizar un rendimiento óptimo del componente en su aplicación final.

3.7.2 Comparación entre las plumas

En la figura 115, podemos ver la primera optimización que obtenemos tras la simulación del brazo con todos los componentes. Donde a primera vista podemos ver una pieza algo abstracta y muy seguramente complicada para su manufactura. Aun que tras un proceso de renderizado se podrá obtener al menos un diseño peculiar para si aplicación en campo.

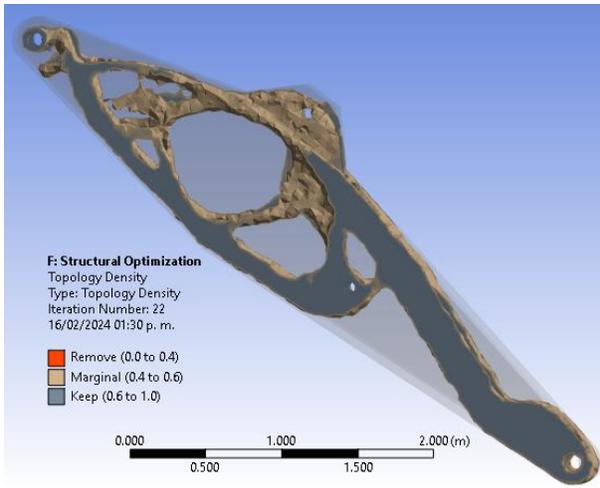


Figura 115 Primer caso en la optimización con de la pluma

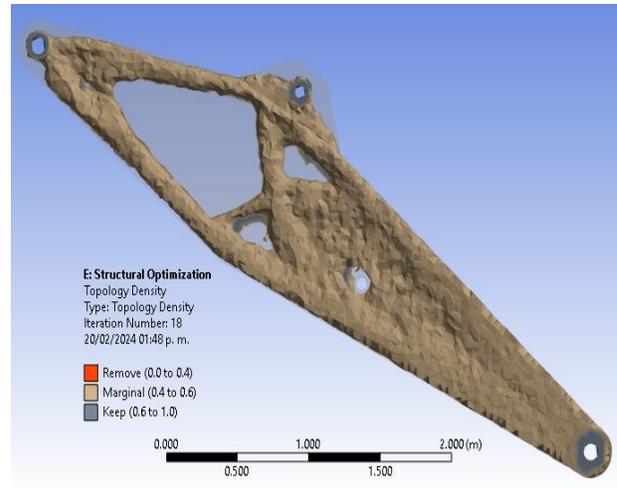


Figura 116 Resultados de la segunda optimización de la pluma

De igual manera en la figura 116. Podemos ver la 2da optimización, podemos ver un cuerpo y una geometría más resistente, como podemos ver en la figura 117, van en secuencia de las optimizaciones, siendo la de la izquierda del primer caso y la de la derecha del segundo, sus masas tienen una diferencia considerable de una tonelada. Pero por la geometría de la segunda optimización es la que se ve más susceptible para su manufactura, además de que a simple viste se ve con un mejor acabo y no requeriría la necesidad de un renderizado.

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.349
Original Volume	0.74652 m ³
Final Volume	0.27366 m ³
Percent Volume of Original	36.658
Original Mass	5860.2 kg
Final Mass	2148.3 kg
Percent Mass of Original	36.658

Results	
Minimum	1.e-003
Maximum	1.
Average	0.43567
Original Volume	0.74652 m ³
Final Volume	0.39472 m ³
Percent Volume of Original	52.874
Original Mass	5860.2 kg
Final Mass	3098.5 kg
Percent Mass of Original	52.874

Figura 117 Resultados de la optimización de la pluma

CAPITULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusión

La optimización topológica de la pluma y el brazo ha revelado valiosa importancia en el diseño de piezas con un comportamiento dinámico, una tarea más desafiante en comparación con las piezas estáticas. A lo largo de esta investigación, hemos llegado a una sencilla conclusión de que las piezas optimizadas no solo son una opción viable, sino la mejor elección para el desempeño para el cual fueron diseñadas, analizadas y estudiadas.

La optimización no solo se traduce en una reducción significativa de material, sino que también conlleva una disminución en los costos de producción, manteniendo o incluso mejorando la eficiencia, resistencia y durabilidad de las piezas. A pesar de la existencia de piezas genéricas o robustas que cumplen con funciones similares, las optimizadas destacan por su capacidad para adaptarse a los requerimientos específicos de carga y rendimiento, lo que las convierte en la elección preferida.

Cuando se trata de sistemas dinámicos, como es el caso del brazo en análisis, la complejidad se incrementa. La consideración de fuerzas máximas de operación, especialmente en equipos como excavadoras diseñadas para realizar esfuerzos pesados, agrega un nivel adicional de desafío. Sin embargo, incluso en entornos dinámicos, la optimización topológica demuestra ser capaz de mantenerse robusta y resistente, soportando cargas de manera eficiente gracias a las configuraciones cuidadosamente diseñadas.

En última instancia, la elección entre piezas optimizadas y otras opciones depende de las necesidades específicas del consumidor. La capacidad de satisfacer requisitos particulares, junto con los beneficios tangibles de la optimización, hace que estas piezas destaquen como la elección más acertada en el diseño de sistemas dinámicos, como es evidente en el caso de la excavadora y su brazo optimizado.

4.1 Recomendaciones

Al realizar optimizaciones topológicas en cuerpos dinámicos, se pueden considerar varias recomendaciones para garantizar resultados efectivos y robustos. Las más importantes bajo mi consideración sería verificar el entendimiento del comportamiento dinámico implica analizar cómo las fuerzas afectan la estructura en movimiento y evaluar la respuesta del sistema a cargas aplicadas, analizando deformaciones, tensiones y desplazamientos en diversas condiciones. La interacción entre las fuerzas y la estructura es crítica para asegurar que el diseño pueda resistir tensiones dinámicas y mantener su integridad funcional.

Al considerar las fuerzas máximas de operación, se busca evaluar la carga máxima que el sistema experimentará, dimensionando adecuadamente las áreas críticas y garantizando la resistencia suficiente. Este enfoque proactivo incluye identificar escenarios exigentes, como aceleraciones bruscas, frenadas intensas o cargas externas imprevistas, que podrían impactar el rendimiento del sistema.

La adaptabilidad a cambios dinámicos es esencial en el diseño de la optimización topológica. La flexibilidad y capacidad de respuesta ante variaciones en fuerzas y movimientos son cruciales para asegurar la eficacia a lo largo del tiempo y adaptarse a situaciones dinámicas cambiantes. Esto implica considerar tanto cargas estáticas como dinámicas, ajustándose a fluctuaciones en las condiciones de operación.

La capacidad de respuesta ante variaciones implica la consideración de amortiguadores, elementos elásticos o sistemas de control que puedan adaptarse de manera inteligente a cambios en tiempo real. Un diseño óptimo debe tener en cuenta la variabilidad inherente a situaciones dinámicas, ajustándose sin comprometer eficacia o seguridad.

CAPITULO V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Servicios de transporte de excavadoras - heavy haulers - (407) 574-2373. (s.f.). ¡Heavy Haulers - Get a shopping quite! - Heavy Equipment Transport Specialists. <https://www.heavyhaulers.com/es/transpde-excavadoras.php#:text=Los%20transportes%20de%20excavadoras%20hidráulicas%20se%20cargan%20la%20pluma,el%20eje%20delantero%20del%20remolque>.
- [2] Excavadoras. (s.f.). John Deere. <https://www.deere.com.mx/es/excavadoras/>
- [3] D. Kane. “¿Cuánto pesa una excavadora? - Boom & Bucket”. Buy and Sell Used Heavy Equipment - Boom & Bucket. Accedido el 11 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.boomandbuhow-much-does-a-bulldozer-weigh>
- [4] Optimización topológica (4). (s.f.). (p. 29). Universidad de Sevilla. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/proy/4296/fichero/VolumenI%2F4.pdf>
- [5] André, m. (2019, 16 de enero). Excavadora: una máquina que ha construido la historia. Europa mop - compre y venda sus materiales mop-construcción fácilmente! <https://www.europamop.com/enfoque-material-14/excavadora#:text=la%20historia%20de%20la%20excavadora%20no%20es%20reciente%20ya%20que,la%20excavadora%20a%20vapor%20otis>.
- [6] El origen de la excavadora - Almerisan. (2019, 28 de octubre). Almerisan. <https://almerisan.es/elorigen-de-la-excavadora/>
- [7] Encinas Robles, P. (2023). Introducción a las superficies minimales en el espacio euclídeo [Grado en Matemáticas e Informática, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/75547/> Conclusiones Reporte de Residencias Profesional

- [8] Bendsøe, M. P. & Kikuchi, N. (1988). *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71, 2, 197 - 224.
- [9] Furrieta Ortiz, N. (2014). Optimización Topológica de Estructuras con Algoritmo de Estimación de Distribución [Trabajo de grado, Centro de Investigación en matemáticas, A.C.]. CIMAT.
- [10] París López, J. (2007). Restricciones en tensión y minimización del peso: una metodología general para la optimización topológica de estructuras [Tesis Doctoral inédita]. Universidad De Da ‘Coruña.
- [11] Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. (2015). *El hombre y la Máquina*, 01(46), 72–79.
- [12] Simulación numérica-Itmati. (s.f.). Itmati-Instituto Tecnológico de Matemática Industrial. [http://www.itmati.com/Simulación_numérica#:text=La %20simulación %20numérica %20integra %20las, y %20de %20las %20ciencias %20aplicadas](http://www.itmati.com/Simulación_numérica#:text=La%20simulación%20numérica%20integra%20las,y%20de%20las%20ciencias%20aplicadas).
- [13] Laín Beatove, S. (2014). La simulación numérica en problemas de ingeniería. *El Hombre y la Máquina*, (44), 5–6.
- [14] “Maquinaria industrial | SIMULIA”. We are the 3DEXPERIENCE company | Dassault Systèmes. Accedido el 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/soluciones/maquinaria-industrial/>
- [15] “¿Sabes por qué los triángulos se utilizan en construcción? | Serycoin”. Serycoin. Accedido el 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://serycoin.com/sabes-los-triangelos-estan-todas->

[partes/#:-:text=Esto%20se%20debe%20a%20que,estable%20hasta%20que%20se%20triangule.](#)

- [16] M. A. Mejía Huidobro, A. D. Camacho Vera y M. Marcelina Aranda, “Estrategias del sector público y privado para la implementación de la industria 4.0 en México”, Rev. UPIICSA Investigación. Interdisciplina., vol. 6, n.º 1, p. 19, 202.
- [17] Y. Cortes, “El entorno de la industria 4.0: Implicaciones y perspectivas futuras”, Concienc. Tecnol., n.º 54, p. 19, 2017.
- [18] “Los softwares de optimización topológica para impresión 3D - 3Dnatives”. 3Dnatives. Accedido el 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.3dnatives.com/es/softwareoptimizacion-topologica-230920212/>
- [19] Mechan Casiano, D. E. (2020). Estudio de la dinámica de una máquina excavadora con ayuda de la herramienta CAD/CAE Working Model [Trabajo de grado inédito]. Universidad de Piura.
- [20] “Une 115443:2003”. AENOR - Buscador de Normas y Libros AENOR Certificación. Accedido el 5 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://tienda.aenor.com/norma-une-115443-2003- n0028743>.
- [21] Caso Salazar, M. D. (2008). Brazo excavador compacto [Trabajo de grado inédito]. Pontificia universidad católica del Perú.
- [22] “Aceros rápidos HSS - cromova”. Inicio - cromova. Accedido el 6 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.cromova.es/productos/aceros-rapidos-hss>

- [23] “Aceros para automoción de baja aleación y alta resistencia (HSLA) de Docol”. SSAB. Accedido el 6 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ssab.com/es-mx/marcas-yproductos/docol/calidades-de-acero-para-automocion/aceros-hsla>
- [24] “Las excavadoras del siglo XXI - Minería Panamericana”. Minería Panamericana. Accedido el 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.mineria-pa.com/productos-y-tecnologia/las-excavadoras-del-siglo-xxi/>

CAPITULO VI. ANEXOS

Contenido de anexos;

1. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “repisa”.
2. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “soportes de carga”.
3. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “primer criterio”.
4. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “capas de nivel”.
5. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “la estructura de “Mitchell””.
6. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto “rediseño de pieza”.
7. Diseño asistido por computadora con el software de Solid Works de la excavadora.
8. Reporte generado por “*Ansys Project*” de la primera optimización topológica.
9. Reporte generado por “*Ansys Project*” del proyecto segunda optimización topológica.