



**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR
DE ATLIXCO**

Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Puebla

NOMBRE DEL TRABAJO

**DISEÑO MECÁNICO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR
ELEMENTO FINITO DE UNA MÁQUINA
DESTERRONADORA-CERNIDORA DE ARCILLA**

OPCIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA:

ABRIL RUBI LEZAMA MAYORGA

ASESOR: DR. FERNANDO SÁNCHEZ TEXIS

ATLIXCO, PUE. NOVIEMBRE DE 2022



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
TECNM CAMPUS ATLIXCO**

NOMBRE DEL PROYECTO

**DISEÑO MECÁNICO Y ANÁLISIS
ESTRUCTURAL POR ELEMENTO FINITO
DE UNA MÁQUINA DESTERRONADORA-
CERNIDORA DE ARCILLA.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE:**

INGENIERO MECATRÓNICO

P R E S E N T A:

Abril Rubi Lezama Mayorga

ASESOR: Dr. Fernando Sánchez Taxis

ATLIXCO, PUEBLA, MÉXICO, NOVIEMBRE 2022

Dedicatoria

*Dedico esta tesis con mucho cariño a mi mamá, Aurora, pues ella fue mi inspiración y motivación para seguir adelante y no darme por vencida en todos los ámbitos de mi vida, sentó las bases de responsabilidad y deseos de alcanzar el éxito.
En ella encuentro a la persona que siempre quiero ser y a la que siempre admiraré.*

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá y a mi papá por siempre estar presentes en cada etapa de mi vida, por su apoyo incondicional y la confianza puesta en mí; a mi hermana menor por ser esa persona que me incentiva a ser mejor día con día; a mi novio por reforzarme en muchos aspectos de mi vida, por todo su afecto y comprensión.

Gracias a mis amigos de generación más cercanos que me apoyaron a lo largo de mi estancia en la carrera y con los que hice un gran equipo para finalizar cada proyecto; a mis maestros y asesores de tesis que fueron parte importante de mi desarrollo profesional, siempre dispuestos a resolver mis dudas.

Agradezco también a todas esas personas cercanas y desconocidas que en alguna parte del camino me ayudaron sin esperar nada a cambio o bien, tuvieron una palabra de aliento para mí.

Doy gracias a Dios por todos los aprendizajes adquiridos, por permitirme alcanzar este logro, por todas las altas y bajas a lo largo de mi vida y gracias por permitirme compartir este triunfo con las personas que más quiero.

Resumen

En este trabajo se presenta el modelado 3D y el análisis estructural de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla basado en el criterio de Von Mises y el método del elemento finito, mediante el software de diseño SolidWorks. Los resultados exponen las fuerzas resistivas generadas por la materia prima, los esfuerzos presentes, las deformaciones y desplazamientos generados en los elementos que conforman el desterronador y la estructura. De acuerdo a los resultados obtenidos en SolidWorks los elementos satisfacen un factor de seguridad mayor a 1.5, por tanto, se comprueba que las piezas no fallaran bajo condiciones de trabajo normales.

Palabras clave: Desterronadora, Cernidora, Análisis estático, Diseño mecánico, Elemento Finito, Esfuerzo de Von Mises.

Abstract

This paper presents the 3D modeling and structural analysis of a clay lump-sieving machine based on the Von Mises criterion and the finite element method, using the SolidWorks design software. The results expose the resistive forces generated by the raw material, the present efforts, the deformations, and the displacements generated in the elements that make up the lump shaker, and the structure. According to the results obtained in SolidWorks, the elements satisfy a safety factor greater than 1.5, therefore it is verified that the pieces will not fail under normal working conditions.

Key words: Lump Crusher, Sifter, Static Analysis, Mechanical Design, Finite Element, Von Mises Stress.

Índice general

DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE FÓRMULAS	11
ÍNDICE DE TABLAS	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO 1 . GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS.	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	18
CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA	20
2.2 ANÁLISIS ESTÁTICO	26
2.3 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO	33
2.4 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DEL ELEMENTO FINITO MEDIANTE SOFTWARE CAD	34
2.5 ESTADO DEL ARTE.....	38
CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA.....	41
3.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL	41
3.2 DISEÑO DE LA CAJA DESTERRONADORA	58
3.3 DISEÑO DEL CERNIDOR	70
3.4 DISEÑO DE OTROS ELEMENTOS	76
3.5 ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA	78
3.6 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL DESTERRONADOR.....	85
3.7 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL CERNIDOR	87
CAPÍTULO 4 . RESULTADOS.....	90
4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO MECÁNICO	90
4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO.....	91
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	97
REFERENCIAS	98
ANEXOS	100
GLOSARIO	104

Índice de figuras

FIGURA 1.1. DIAGRAMA DEL PROCESO DE LA ELABORACIÓN DE PIEZAS DE BARRO EN EL MUNICIPIO DE COHUECAN PUEBLA..	16
FIGURA 2.1. USOS DEL DIBUJO ASISTIDO POR COMPUTADORA.....	20
FIGURA 2.2. PROCESO DE DISEÑO.....	21
FIGURA 2.3. USO DE SÍMBOLOS PARA TOLERANCIAS DE POSICIÓN Y FORMA BASADO EN LA NORMA ASME Y14.5M-1994.....	22
FIGURA 2.4. MÓDULOS EXISTENTES EN SOLIDWORKS.....	23
FIGURA 2.5. ENTORNO DE TRABAJO DEL MÓDULO DE PIEZA EN SOLIDWORKS 2018.....	24
FIGURA 2.6. ENTORNO DE TRABAJO DEL MÓDULO ENSAMBLAJE DE SOLIDWORKS 2018.....	25
FIGURA 2.7. VISTA EN CORTE DE UNA CONEXIÓN CON UN PERNO EN CORTANTE.....	27
FIGURA 2.8. DIAGRAMAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE DOS MATERIALES DÚCTILES TÍPICOS.....	28
FIGURA 2.9. A) ELEMENTO CON ESFUERZOS TRIAXIALES; ESTE ELEMENTO EXPERIMENTA CAMBIO DE VOLUMEN Y DISTORSIÓN ANGULAR, B) ELEMENTO SOMETIDO A TENSIÓN HIDROSTÁTICA QUE SOLO EXPERIMENTA CAMBIO DE VOLUMEN, C) ELEMENTO CON DISTORSIÓN ANGULAR SIN CAMBIO DE VOLUMEN.....	28
FIGURA 2.10. TEORÍA DE ENERGÍA DE DISTORSIÓN (ED) DE ESTADOS DE ESFUERZO PLANO. ÉSTA ES UNA GRÁFICA REAL DE PUNTOS QUE SE OBTIENEN MEDIANTE LA ECUACIÓN 2.10 CON $\sigma' = S_y$	31
FIGURA 2.11. MODELOS TRIDIMENSIONALES PARAMÉTRICOS.....	35
FIGURA 2.12. DIAGRAMA DE LAS ETAPAS PARA REALIZAR UN ANÁLISIS ESTÁTICO EN SOLIDWORKS.....	37
FIGURA 2.13. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA CUCHILLA DE CORTE PARA UNA TRITURADORA DE PET.....	39
FIGURA 2.14. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA DE UNA MÁQUINA CERNIDORA DE ARENA VERDE EN SOLIDWORKS.....	39
FIGURA 2.15. PARTES DE UN MOLINO DE MARTILLOS MÓVILES PARA UNA MÁQUINA TRITURADORA-TAMIZADORA.....	40
FIGURA 3.1. PRIMER DISEÑO: ESTRUCTURA SUPERIOR EN 2D.....	41
FIGURA 3.2. PRIMER DISEÑO: SOPORTES DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.....	42
FIGURA 3.3. PRIMER DISEÑO: ESTRUCTURA SUPERIOR EN 3D TERMINADA.....	42
FIGURA 3.4. PRIMER DISEÑO: ESTRUCTURA INFERIOR EN 2D.....	43
FIGURA 3.5. PRIMER DISEÑO - SOPORTES DE LA ESTRUCTURA INFERIOR: A) SOPORTES PRINCIPALES, B) SOPORTES SECUNDARIOS FRONTALES, C) SOPORTES TERCARIOS FRONTALES, D) SOPORTES SECUNDARIOS LATERALES.....	43

FIGURA 3.6. COMANDO PARA DEFINIR EL MATERIAL DENTRO DE SOLIDWORKS.....	44
FIGURA 3.7. COMPONENTES INDIVIDUALES DE LA ESTRUCTURA: A) PIEZA CON CORTE RECTO, B) PIEZA CON DOS CORTES A 45°, C) PIEZA CON UN CORTE A 45°. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2022).....	45
FIGURA 3.8. MEDIDAS GENERALES DE CADA PIEZA DISEÑADA BASADAS EN EL MATERIAL PTR A UTILIZAR.....	46
FIGURA 3.9. SELECCIÓN DEL MÓDULO “ENSAMBLAJE” EN SOLIDWORKS 2018..	47
FIGURA 3.10. LAS PIEZAS UTILIZADAS PARA ENSAMBLAR LA ESTRUCTURA INFERIOR SE AGREGAN DESDE LA OPCIÓN “INSERTAR COMPONENTES”.....	47
FIGURA 3.11. DEFINICIÓN DE RELACIONES ENTRE LAS PIEZAS PARA CONFORMAR EL ENSAMBLE FINAL..	48
FIGURA 3.12. SEGUNDO DISEÑO DE LA ESTRUCTURA INFERIOR: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	48
FIGURA 3.13. SEGUNDO DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	49
FIGURA 3.14. PTR CREADO PARA SUJETAR LA CHUMACERA DE PARED: A) PIEZA SUPERIOR DE SUJECCIÓN DE CHUMACERA, B) PIEZA INFERIOR DE SUJECCIÓN DE CHUMACERA.....	50
<i>FIGURA 3.15. SEGUNDO DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR CON SOPORTES PARA CHUMACERAS: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.</i>	<i>50</i>
FIGURA 3.16. DISEÑO DE LOS SOPORTES A INCORPORAR EN LA ESTRUCTURA INFERIOR: A) CROQUIS DEL SOPORTE PTR, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE DE LA PIEZA.	51
FIGURA 3.17. EXTRUCCIÓN CORTE CIRCULAR A LA PIEZA FINAL DEL SOPORTE: A) CROQUIZADO 2D, B) VISTA ISOMÉTRICA.....	51
FIGURA 3.18. RECUBRIMIENTOS DE LA ESTRUCTURA INFERIOR: A) CROQUIZADO DEL RECUBRIMIENTO LATERAL, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE DE 2MM DEL RECUBRIMIENTO LATERAL, C) CROQUIZADO DEL RECUBRIMIENTO FRONTAL, D) EXTRUCCIÓN SALIENTE 2MM DEL RECUBRIMIENTO FRONTAL.....	52
FIGURA 3.19. INCORPORACIÓN DE LOS SOPORTES AL ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA INFERIOR Y SUS RELACIONES DE POSICIÓN.....	53
FIGURA 3.20. DISEÑO FINAL DE LA ESTRUCTURA INFERIOR: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	53
FIGURA 3.21. DISEÑO DEL SOPORTE CENTRAL CON ORIFICIO PARA CHUMACERA Y CORTE A 45° PARA SU CONEXIÓN A LA ESTRUCTURA SUPERIOR..	54
FIGURA 3.22. CONEXIONES DEL EJE CENTRAL A LA ESTRUCTURA SUPERIOR: A) SOPORTE CON CORTE A 45°, B) SOPORTE CON DOS CORTES A 90°.....	54
FIGURA 3.23. RECUBRIMIENTOS DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR: A) CROQUIZADO DEL RECUBRIMIENTO LATERAL, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE DE 2MM DEL RECUBRIMIENTO LATERAL.....	55
FIGURA 3.24. RECUBRIMIENTOS DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR: A) CROQUIZADO DEL RECUBRIMIENTO FRONTAL, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE DE 2MM DEL RECUBRIMIENTO FRONTAL.....	55
FIGURA 3.25. UBICACIÓN Y CONEXIÓN DE LOS SOPORTES CREADOS PARA LA ESTRUCTURA SUPERIOR..	56

FIGURA 3.26. DISEÑO FINAL DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	56
FIGURA 3.27. ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA DESTERRONADORA-CERNIDORA DE ARCILLA: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	57
FIGURA 3.28. CROQUIS DEL PRIMER DISEÑO DEL ASPA: A) PRIMER DISEÑO DEL ASPA EN SOLIDWORKS, B) PRIMER DISEÑO DEL ASPA IMPRESO EN 3D..	58
FIGURA 3.29. SEGUNDO DISEÑO DEL ASPA: A) SEGUNDO DISEÑO DEL ASPA EN SOLIDWORKS, B) SEGUNDO DISEÑO DEL ASPA IMPRESO EN 3D.....	59
FIGURA 3.30. TERCER DISEÑO DEL ASPA.....	59
FIGURA 3.31. DISEÑO FINAL DEL ASPA: A) CROQUIS EN 2D, B) MODELADO 3D EN SOLIDWORKS, C) IMPRESIÓN 3D..	60
FIGURA 3.32. PRIMER DISEÑO DEL DISCO EN SOLIDWORKS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA (2022).	61
FIGURA 3.33. DISEÑO FINAL DEL DISCO: A) DIMENSIONES DEL DISCO, B) IMPRESIÓN DEL DISCO EN 3D.....	61
FIGURA 3.34. PRIMER DISEÑO DEL EJE..	62
FIGURA 3.35. DISEÑO FINAL DEL EJE.....	62
FIGURA 3.36. PRIMER DISEÑO DE LA CAJA DESTERRONADORA: A) CROQUIZADO 1, B) CROQUIZADO 2, C) EXTRUCCIÓN DE CORTE.....	63
FIGURA 3.37. VISTA ISOMÉTRICA DEL PRIMER DISEÑO DE LA CAJA DESTERRONADORA.	64
FIGURA 3.38. SEGUNDO DISEÑO DE LA CAJA DESTERRONADORA: A) CROQUIZADO, B) EXTRUCCIÓN DE CORTE, C) VISTA ISOMÉTRICA.....	64
FIGURA 3.39. DISEÑO FINAL DE LA CAJA DE LA DESTERRONADORA: A) CROQUIZADO, B) VISTA ISOMÉTRICA.....	65
FIGURA 3.40. PRIMER DISEÑO DE LA LÁMINA: A) CROQUIZADO, B) MATRIZ LINEAL, C) VISTA ISOMÉTRICA..	66
FIGURA 3.41. DISEÑO FINAL DE LA LÁMINA.....	66
FIGURA 3.42. ENSAMBLES ASPAS-DISCOS: A) ENSAMBLE SENCILLO, B) ENSAMBLE DOBLE, C) ENSAMBLE EN CRUZ..	67
FIGURA 3.43. VISTA ISOMÉTRICA DEL ENSAMBLE FINAL DE LAS ASPAS-DISCOS Y EJE.	68
FIGURA 3.44. ENSAMBLE FINAL DE LA DESTERRONADORA: A) VISTA LATERAL , B) VISTA LATERAL CON GIRO EN LAS ASPAS, C) VISTA ISOMÉTRICA..	69
FIGURA 3.45. PRIMER DISEÑO DEL CERNIDOR: A) CROQUIZADO Y MODELADO 3D, B) EXTRUCCIÓN DE CORTE, C) SOPORTES LATERALES.....	70
FIGURA 3.46. VISTA ISOMÉTRICA DEL PRIMER DISEÑO DEL CERNIDOR.....	71
FIGURA 3.47. ÁNGULO DISEÑADO PARA CONFORMAR LA ESTRUCTURA DEL CERNIDOR: A) CROQUIS, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE.....	71

FIGURA 3.48. ELEMENTO DE CONEXIÓN PARA LOS ÁNGULOS DISEÑADOS.	72
FIGURA 3.49. RECUBRIMIENTO LATERAL DEL CERNIDOR: A) CROQUIS, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE.	72
FIGURA 3.50. RECUBRIMIENTO FRONTAL DEL CERNIDOR: A) CROQUIS, B) EXTRUCCIÓN DE CORTE.	73
FIGURA 3.51. SOPORTE DEL CERNIDOR: A) CROQUIS, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE.	73
FIGURA 3.52. RODAMIENTO DEL CERNIDOR: A) CROQUIS, B) EXTRUCCIÓN SALIENTE.	73
FIGURA 3.53. PERFORACIONES DE LA MALLA DEL CERNIDOR.....	74
FIGURA 3.54. ENSAMBLE SENCILLO DEL CERNIDOR: A) ESTRUCTURA CON PERFORACIONES, B) COLOCACIÓN DE LA MALLA Y LOS RECUBRIMIENTOS..	74
FIGURA 3.55. DISEÑO FINAL DEL CERNIDOR: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA..	75
FIGURA 3.56. DISEÑO DE CHUMACERA F205: A) PARTE 1, B) PARTE 2, C) ENSAMBLE.	76
FIGURA 3.57. DISEÑO DE MOTOR: A) VISTA LATERAL, B) VISTA ISOMÉTRICA..	77
FIGURA 3.58. ACTIVACIÓN DEL COMPLEMENTO DE SOLIDWORKS SIMULATION.	78
FIGURA 3.59. MENÚ DE OPERACIONES DEL COMPLEMENTO SOLIDWORKS SIMULATION.....	78
FIGURA 3.60. A) CREACIÓN DE UN NUEVO ESTUDIO DE ANÁLISIS ESTÁTICO, B) ÁRBOL DE OPERACIONES DEL ANÁLISIS ESTÁTICO.....	78
FIGURA 3.61. GRAVEDAD APLICADA A LA ESTRUCTURA INFERIOR.....	79
FIGURA 3.62. SEGUNDA FUERZA EXTERNA APLICADA A LA ESTRUCTURA INFERIOR.	80
FIGURA 3.63. TERCERA FUERZA EXTERNA APLICADA A LA ESTRUCTURA INFERIOR..	80
FIGURA 3.64. SOPORTES DE LA ESTRUCTURA INFERIOR.....	81
FIGURA 3.65. ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA INFERIOR..	81
FIGURA 3.66. GRAVEDAD APLICADA A LA ESTRUCTURA SUPERIOR.....	82
FIGURA 3.67. SEGUNDA FUERZA EXTERNA APLICADA A LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	83
FIGURA 3.68. TERCERA FUERZA EXTERNA APLICADA A LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	83
FIGURA 3.69. SOPORTES DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.....	84
FIGURA 3.70. ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	84
FIGURA 3.71. GRAVEDAD APLICADA AL DESTERRONADOR..	85
FIGURA 3.72. FUERZAS EXTERNAS DISTRIBUIDAS A LO LARGO DE LAS ASPAS.....	86
FIGURA 3.73. SOPORTES DEL DESTERRONADOR..	86
FIGURA 3.74. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL ENSAMBLE EJE-ASPAS.	87

FIGURA 3.75. GRAVEDAD APLICADA AL CERNIDOR.....	88
FIGURA 3.76. GRAVEDAD APLICADA AL CERNIDOR.....	88
FIGURA 3.77. SOPORTES DEL CERNIDOR. FUENTE:	88
FIGURA 3.78. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CERNIDOR..	89
FIGURA 4.1 ENSAMBLE FINAL DE LA MÁQUINA DESTERRONADORA-CERNIDORA DE ARCILLA: A) VISTA FRONTAL, B) VISTA LATERAL, C) VISTA ISOMÉTRICA..	90
FIGURA 4.2. TENSIONES DE VON MISES DE LA ESTRUCTURA INFERIOR.....	91
FIGURA 4.3. DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA INFERIOR.....	91
FIGURA 4.4. DEFORMACIONES DE LA ESTRUCTURA INFERIOR..	92
FIGURA 4.5. TENSIONES DE VON MISES DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR..	92
FIGURA 4.6. DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	93
FIGURA 4.7. DEFORMACIONES DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.....	93
FIGURA 4.8. TENSIONES DE VON MISES DEL DESTERRONADOR.....	94
FIGURA 4.9. DESPLAZAMIENTOS DEL DESTERRONADOR.....	94
FIGURA 4.10. DEFORMACIONES DEL DESTERRONADOR.....	94
FIGURA 4.11. TENSIONES DE VON MISES DEL CERNIDOR..	95
FIGURA 4.12. DESPLAZAMIENTOS DEL CERNIDOR..	95
FIGURA 4.13 DEFORMACIONES DEL CERNIDOR.	96

Índice de fórmulas

ECUACIÓN 2.1	29
ECUACIÓN 2.2	29
ECUACIÓN 2.3	29
ECUACIÓN 2.4	29
ECUACIÓN 2.5	30
ECUACIÓN 2.6	30
ECUACIÓN 2.7	30
ECUACIÓN 2.8	30
ECUACIÓN 2.9	30
ECUACIÓN 2.10	30
ECUACIÓN 2.11	31
ECUACIÓN 2.12	31
ECUACIÓN 2.13	31
ECUACIÓN 2.14..	33

Índice de tablas

TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES QUE CONTIENE EL SOFTWARE DE DISEÑO SOLIDWORKS.	23
TABLA 2.2. FACTORES DE SEGURIDAD.	32
TABLA 2.3. ANÁLISIS COMUNES APLICANDO FEA.	35
TABLA 2.4. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL CÁLCULO DE ELEMENTOS FINITOS.	36
TABLA 3.1. PROPIEDADES DEL ACERO GALVANIZADO.	44
TABLA 3.2. PROPIEDADES DEL ACERO AL CARBÓN NO ALEADO.	45
TABLA 3.3. MEDIDAS DE LOS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA INFERIOR.	46
TABLA 3.4. MEDIDAS DE LOS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	46
TABLA 3.5. MEDIDAS DE LOS COMPONENTES DEL DISEÑO FINAL DEL CERNIDOR.	72
TABLA 3.6. FUERZAS RESULTANTES APLICADAS SOBRE LA ESTRUCTURA INFERIOR.	82
TABLA 3.7. FUERZAS RESULTANTES APLICADAS SOBRE LA ESTRUCTURA SUPERIOR.	85
TABLA 3.8. FUERZAS RESULTANTES APLICADAS SOBRE LAS ASPAS DEL DESTERRONADOR.	87
TABLA 3.9. FUERZAS RESULTANTES APLICADAS SOBRE EL CERNIDOR.	89

Introducción

Se denominan actividades económicas a todas aquellas actividades por medio de las cuales los seres humanos satisfacen sus necesidades y generan ganancias dentro del mercado para sus productores. (Cáceres, 2013)

Podemos distinguir actividades económicas primarias, secundarias y terciarias. Las actividades artesanales son secundarias en su clasificación según su función, modificar la materia prima y solo en el estado de Puebla, involucra a más de 50,000 personas, quienes viven de las artesanías como primera o segunda fuente de ingresos.

Existen diversas técnicas artesanales que van desde la cerámica y alfarería hasta la joyería. La alfarería es el arte de elaborar vasijas de barro cocido y es considerada como la industria de mayor antigüedad; sin embargo, hoy en día esta actividad tiene una carga económica en distintos municipios del estado de Puebla, entre los que se encuentra el municipio de Cohuecan.

Cohuecan se localiza en la parte centro oeste del estado de Puebla y tiene como principal actividad económica a la alfarería, que representa a un 65% de la población que se dedica a desempeñar esta actividad comercial de manera puramente artesanal y manual en cada etapa del proceso de producción. A pesar del porcentaje, actualmente no existen proyectos dedicados a potencializar este oficio, tanto a nivel económico como a nivel social, convirtiéndose así en una de las comunidades más abandonadas del estado de Puebla. Ante tal preocupación, se propuso implementar un proyecto de ingeniería, centrado en la actividad alfarera, destinado a impulsar la reactivación económica del municipio y que, además, mejore la calidad de vida laboral de las familias dedicadas a este arte.

Aun cuando la alfarería es por naturaleza un trabajo manual, actualmente es posible simplificar las dos primeras etapas del proceso de producción utilizando una máquina destinada y especializada en ello; estas dos etapas son el desterronado y cernido de la materia prima que, para el caso de Cohuecan es el barro rojo. Si bien estas dos máquinas existen individualmente en el mercado, no existe una alternativa más viable, eficiente y económica que realice ambos procesos secuencialmente, sustituyendo así, la actividad manual en estas dos etapas.

El proyecto mencionado tiene como objetivo impulsar la reactivación económica del municipio de Cohuecan a través del diseño de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla que eficiente las dos primeras etapas del proceso de producción alfarera.

La metodología implementada abarca el diseño mecánico de la estructura de la máquina, de las aspas y eje del desterronador, de la caja cernidora, así como de los elementos de sujeción y transmisión de potencia como lo son las chumaceras y poleas. Una vez incorporados todos los elementos en un solo sistema, se realizan los correspondientes análisis estáticos, mediante el complemento de *Simulación* de *SolidWorks*, para comprobar la viabilidad de los materiales a emplear en su construcción y los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos presentes al aplicarles una determinada carga.

El trabajo se divide en cuatro diferentes capítulos descritos brevemente a continuación:

- Capítulo 1 – Generalidades del Proyecto: Se sitúa al lector en la situación problemática del proyecto, así como en los objetivos y la justificación de este.
- Capítulo 2 – Marco Teórico: Recopilación de investigaciones previas y consideraciones teóricas en las que se sustenta un proyecto de investigación.
- Capítulo 3 – Metodología: Presenta los pasos implementados para el diseño mecánico de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla, así como para la realización de los análisis estáticos.
- Capítulo 4 – Resultados: Presentación e interpretación real de los resultados de acuerdo con las expectativas planteadas.

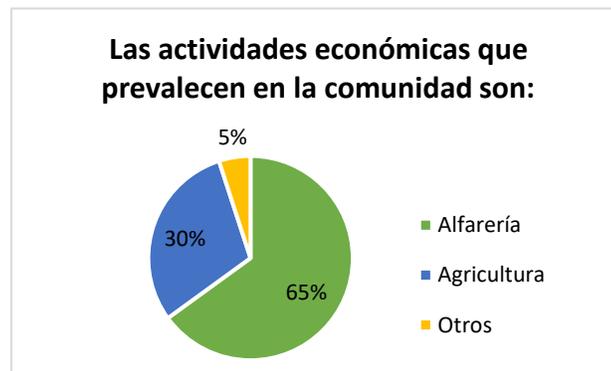
Capítulo 1 . Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema.

El descubrimiento de la alfarería se remonta a los orígenes de la civilización, y hoy en día sigue siendo un arte que está muy presente en nuestras vidas. De acuerdo con el diccionario de la Real Academia Española, la alfarería es el arte u oficio de hacer vasijas u otros objetos de barro cocido. También se le denomina así, al taller, tienda o puesto de objetos de barro cocido.

La alfarería es considerada a nivel internacional como artesanía y tradición; sin embargo, en muchos otros países, como España, Colombia y México, también es considerada como fuente económica y de empleo para muchas familias dedicadas a esta actividad.

La alfarería es la actividad artesanal que más se practica en México en casi todas las entidades federativas, tal es el caso de Puebla, Michoacán y Guanajuato, de acuerdo con el Fondo Nacional para el Fomento de las Artesanías (Fonart). Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), durante 2016 los productos artesanales generaron una derrama económica de 91 mil 612 millones de pesos como parte del Producto Interno Bruto (PIB) en el sector cultural.

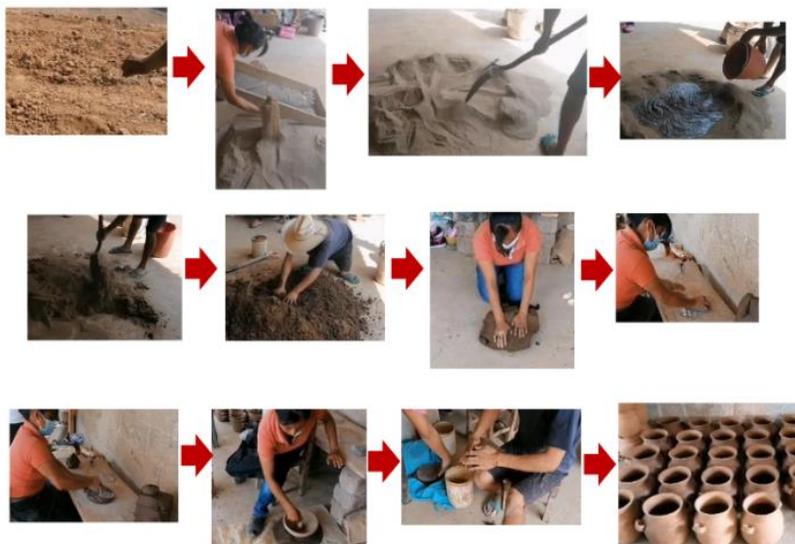


Gráfica 1.1 Actividades económicas con mayor impacto en el municipio de Cohuecan. Fuente: Elaboración propia (2022).

Uno de los municipios con mayor auge en la actividad alfarera es el municipio de Cohuecan, ubicado en la parte centro oeste del estado de Puebla en donde, según los resultados arrojados por las 386 encuestas aplicadas por colaboradores del Instituto Tecnológico Superior de Atlixco (ITSA), Instituto Tecnológico Superior de Acatlán de Osorio (ITSAO) y de la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM), la alfarería representa el 65% de derrama económica de la región, convirtiéndola así, en la actividad económica principal de sus habitantes (Ver Gráfica 1.1)

Para que las ollas, platos, vasos y una lista interminable de piezas lleguen a las manos de los consumidores finales se necesita que los alfareros desarrollen cinco etapas: desterronado,

cernido, preparación, amasado y cortado-aplanado de la materia prima, que, para el municipio de Cohuecan, es el barro o arcilla rojo.



*Figura 1.1. Diagrama del proceso de la elaboración de piezas de barro en el municipio de Cohuecan Puebla.
Fuente: Elaboración propia (2022).*

Según las encuestas realizadas, la mayoría de las familias del municipio de Cohuecan dedicadas a la alfarería realizan la primera fase del proceso con ayuda de una desterronadora básica de una capacidad máxima de 5 kg o bien, en condiciones más limitadas, el desterronado lo realizan manualmente con ayuda de una pala o un molino de martillo. Las desterronadoras son máquinas destinadas a la disolución de terrones y aglomeraciones, se utilizan siempre cuando en un proceso, por motivos de almacenaje, sedimentación o presión, se presentan (en la mayoría de los casos) grandes trozos/terrones de producto (no deseados) que deben ser triturados a unos determinados tamaños. (Armas, 2020)

Cuando pasan a la etapa del cernido, utilizan una criba de malla delgada para separar la parte más fina de la arcilla una vez desterronada.

Las otras tres etapas contemplan la mezcla de arcilla con agua para preparar la materia prima que, posteriormente, será amasada manualmente por los alfareros. Finalmente, la masa es cortada y aplanada de acuerdo con la pieza a realizar y así, elaborar la artesanía final.

El problema radica en las primeras dos fases del proceso, las cuales son las más desgastantes para el alfarista, y las que mayores problemas a la salud ocasiona como dolor muscular, fatiga y problemas de espalda. Además, al realizar estas dos fases de manera manual la eficiencia del proceso se reduce y el tiempo de producción se incrementa.

Por tal motivo, se plantea el diseño de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla que lleve a cabo las dos primeras etapas del proceso de manera automática y secuencial en un solo sistema, logrando así, reducir el tiempo del proceso de producción y aumentar la eficiencia de este; además de mejorar la calidad de vida en el trabajo de los alfareros.

1.2 Objetivo general y específicos.

1.2.1 Objetivo General

Diseñar la estructura mecánica y realizar el análisis por elemento finito de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla con la finalidad de optimizar el proceso de producción de artesanías de barro rojo en el municipio de Cohuecan, mediante un software de dibujo asistido por computadora.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar la estructura mecánica de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla.
2. Realizar el ensamble de los elementos que conforman la estructura mecánica de la máquina.
3. Simular los esfuerzos y las deformaciones producidos en la estructura y los elementos de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla.
4. Analizar los resultados de esfuerzos y deformaciones arrojados por el software de diseño CAD.

1.3 Justificación.

En México existen regiones con problemas que no han sido atendidos por el Estado durante décadas. Luego, a partir de la pandemia COVID 19, estos problemas se han agudizado.

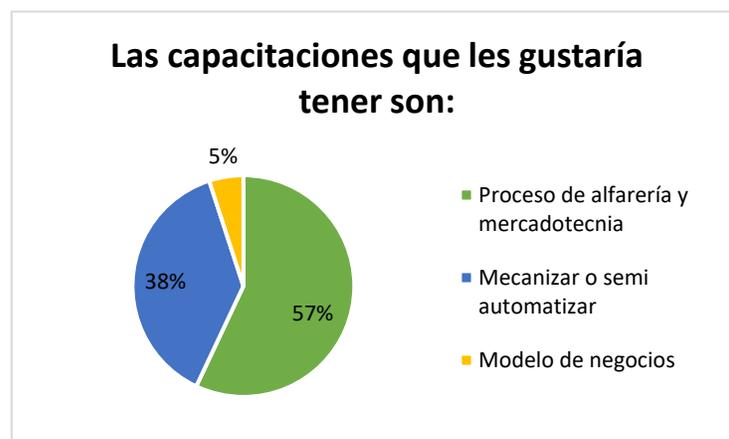
De acuerdo a los datos estimados para 2022 por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), México se encuentra en la quinta posición del ranking regional de países con mayor pobreza total, superado por Honduras, Guatemala, Nicaragua y Colombia, en ambas situaciones.

En el Estado de Puebla se han identificado regiones con poblaciones vulnerables, especialmente en el ámbito social y económico. Inseguridad y pobreza extrema son ejemplos de problemas con mayor presencia entre la población. Uno de los municipios del Estado que se encuentra dentro de esta clasificación es el municipio de Cohuecan.

Cohuecan es una de las comunidades más abandonadas del estado de Puebla, pero con mucho potencial de crecimiento económico y social, siendo la alfarería la principal actividad comercial con mayor potencial de desarrollo productivo que emplea a la mayoría de las familias de la población.

La implementación del diseño de una máquina desterronadora-cernidora de arcilla contribuye, por un lado, a la reactivación económica del municipio de Cohuecan y, por el otro lado, a disminuir el desgaste físico de los alfareros específicamente en las etapas del desterronamiento y cernido de la materia prima.

Existen maquinas desterronadoras y cernidoras independientes en el mercado, las cuales presentan diversas ventajas y desventajas como aislante de sonido y frecuencia baja de vibración; sin embargo, no existe una máquina general que pueda llevar a cabo de manera simultánea dos etapas del proceso artesanal como lo es el desterronado y el cernido de la arcilla y qué, además, se les proporcione una capacitación para poder operar la máquina ya que, de acuerdo con la Gráfica 1.2 mostrada, de las 386 personas encuestadas al 57% le gustaría capacitarse en el proceso de alfarería.



Gráfica 1.2. Identificación de las necesidades de los habitantes del municipio de Cohuecan. Fuente: Elaboración propia (2022).

Aunado a lo anterior, el análisis de los elementos mecánicos, así como la selección del material en ocasiones no es tomado en cuenta a la hora de ser diseñadas estas máquinas de manera independiente. De esta forma, esta máquina es un prototipo que, posteriormente, servirá de base para desarrollar otras máquinas similares destinada al mismo fin, pero con mejores características a fin de seguir perfeccionando los tiempos de producción y disminuir la fatiga física de la población dedicada a la alfarería.

Capítulo 2 . Marco Teórico.

2.1 Diseño Asistido por Computadora

2.1.1 Definición y aplicación del diseño CAD

En la actualidad, el uso de computadoras en la ingeniería, los negocios y la industria ya no es desconocido para la población. La computadora ha acelerado los procedimientos de contabilidad y fabricación, así como la idea de ingeniería. La incorporación de las computadoras al proceso de producción, desde el diseño, pasando por la creación de prototipos y la manufactura, hasta la mercadotecnia, está cambiando la forma en que los futuros técnicos, dibujantes, diseñadores e ingenieros aprenden y se involucran, posteriormente, al mundo laboral.

La influencia del uso de la computadora en la ingeniería y práctica industrial actuales ha traído como consecuencia el desarrollo de nuevos métodos para el *análisis y el diseño, la creación de dibujos técnicos y la resolución de ingeniería*, así como *nuevos conceptos de automatización y robótica*. (Giesecke, Mitchell, & Spencer, 2006)

El **diseño mecánico** (Mott, 2006) es el proceso de diseño o selección de componentes mecánicos para conjuntarlos y lograr una función deseada. Tradicionalmente, los dibujos se hacían a mano mediante el uso de instrumentos de dibujo; hoy en día la computadora es capaz de producir, modificar, almacenar, enviar y transmitir dibujos originales, reemplazando así, la forma clásica. Este método para producir dibujos se llama *Diseño Asistido por computador o Dibujo Asistido por Computadora, CAD*, por sus siglas en inglés *Computer-Aided Design* (Giesecke, Mitchell, & Spencer, 2006). De esta forma, el objetivo final de un diseño mecánico es obtener un producto útil que satisfaga las necesidades de un cliente, y además sea seguro, eficiente, confiable, económico y de manufactura práctica. (Mott, 2006)

Dentro del trabajo CAD (Figura 2.1), los dibujos son utilizados en la creación de geometría paramétrica, en la exhibición del sólido y en la generación de los planos originales. (Rojas Lazo & Rojas Rojas, 2006)

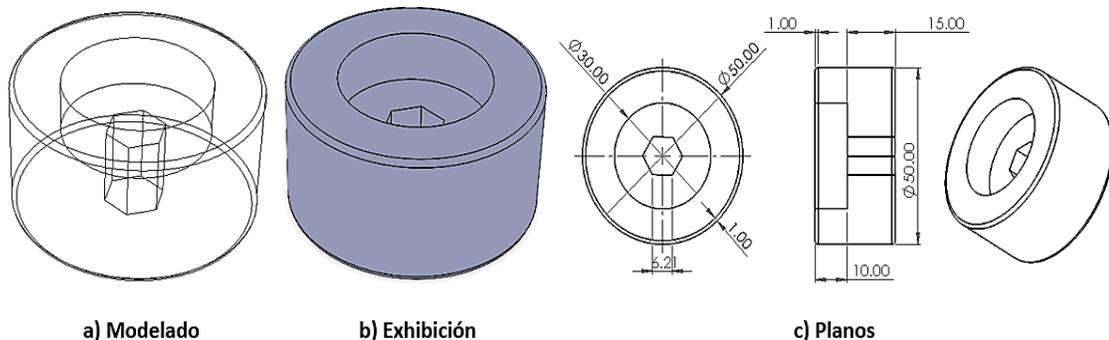


Figura 2.1. Usos del dibujo asistido por computadora. Fuente: Rojas Lazo & Rojas Rojas (2006).

Generalmente, los programas CAD proporcionan una interfase gráfica de usuario (*GUI, Graphics User Interface*) que permite:

- Introducir y manipular objetos geométricos en dos y tres dimensiones.
- Crear dibujos de ingeniería
- Hacer análisis básicos de esfuerzos y deformaciones de estructuras.
- Visualizar piezas individuales y ensambles complejos.

Por otro lado, las características generales de cualquier software CAD/CAE son:

- Simulaciones dinámicas con características especiales de visualización de procesos y resultados (representaciones foto realistas, diagramas, etc.)
- Desarrollo de sistemas virtuales dentro de un entorno, permitiendo en muchos casos eliminar los prototipos físicos.
- Capacidad del software de generar soluciones óptimas según los tipos de aplicación.
- Ingeniería concurrente online (trabajo multidisciplinario vía red, con niveles de acceso y veo procesamiento referenciado).
- Arquitectura abierta del software (posibilidad de personalizar y generar programas complementarios)
- Ingeniería inversa (obtener un modelo CAD a partir del escaneado tridimensional de una pieza real).
- Intercambio estandarizado de formatos de archivos para el trabajo multiplataforma.
- Pantalla de trabajo (Workspace) compartidos con diferentes aplicaciones y programas adicionales (Plug-ins)

2.1.2 Proceso de diseño de ingeniería

El *diseño en ingeniería* es el proceso de concebir ideas en el desarrollo de la solución de un problema tecnológico, para lo cual usa conocimientos, recursos y productos existentes para satisfacer una necesidad o resolver un problema (Rojas Lazo & Rojas Rojas, 2006). El diseño de un objeto debe realizarse respetando normas nacionales e internacionales, por ejemplo, ANSI (American National Standards Institute) e ISO (International Standards Organization).

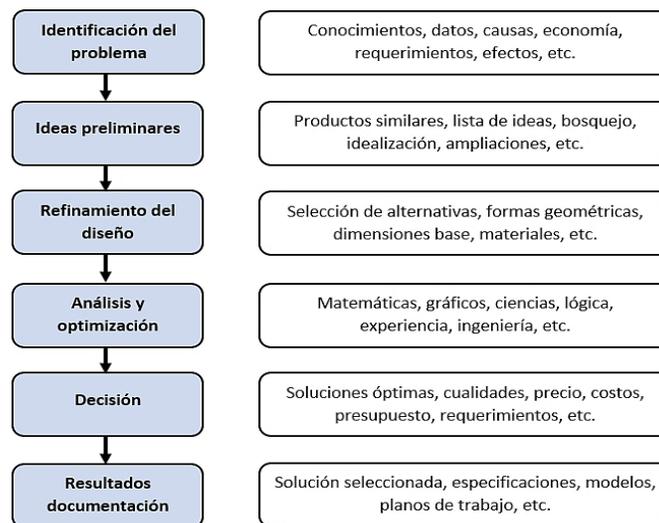


Figura 2.2. Proceso de diseño. Fuente: Rojas Lazo & Rojas Rojas (2006).

En la Figura 2.2 se presenta el proceso lineal general seguido en un proceso de diseño en ingeniería, considerando que todas las etapas son interactivas e iterativas.

El diseño puede dividirse en dos categorías: *diseño de productos* y *diseño de sistemas o procesos*. A medida que se desarrolla el diseño de un producto o proceso, la persona o equipo encargado del diseño tiene la tarea de aplicar los principios de ingeniería, además de tomar en cuenta distintas restricciones, por ejemplo, de presupuesto, funcionalidad y legales.

Es importante mencionar que un diseñador debe proponer más de un concepto de diseño posible como alternativa que satisfaga las funciones y los requisitos de diseño. Además, el diseñador debe hacerse una evaluación crítica completa de las propiedades deseables, las ventajas y desventajas de cada concepto de diseño, para decidir cuál es el concepto óptimo y, en consecuencia, viable para producir (Mott, 2006).

Aunado a lo anterior, resulta esencial para la producción masiva que todos los elementos de un producto se ajusten de manera adecuada, por lo que esta intercambiabilidad requiere que el ingeniero de manufactura controle sus tamaños de manera efectiva pues, la calidad de esta es, principalmente, un factor de *tolerancias de maquinado*. Los productos con pequeñas variaciones en su forma y tamaño se pueden considerar de alta calidad y pueden implicar precios muy altos; cuando el proceso de manufactura no puede mantener la forma y el tamaño dentro de los límites prescritos se incurre en un desperdicio.

La **tolerancia** es una extensión del dimensionamiento. Expresa como fabricar un producto: proporciona información adicional acerca de la forma, el tamaño y la posición de cada elemento de un producto. (Giesecke, Mitchell, & Spencer, 2006) A menudo, los programas de CAD proporcionan funciones para el dimensionamiento, la tolerancia y la verificación de ajustes e interferencias que pueden ayudar en el proceso de designación de tolerancias. En este caso, es tarea del diseñador considerar esta variación tanto como sea posible y permita el uso satisfactorio de la parte maquinada de tal manera que dos o más partes cualesquiera correspondientes se puedan ajustar entre sí. Por ejemplo, una dimensión dada como 1.625 ± 0.002 significa que la parte manufacturada puede ser de 1.6270 o 1.6230 o cualquier otro valor entre estas *dimensiones límite*. La Figura 2.3 presenta combinaciones de diferentes símbolos de dimensión y sus significados utilizados para especificar tolerancias.

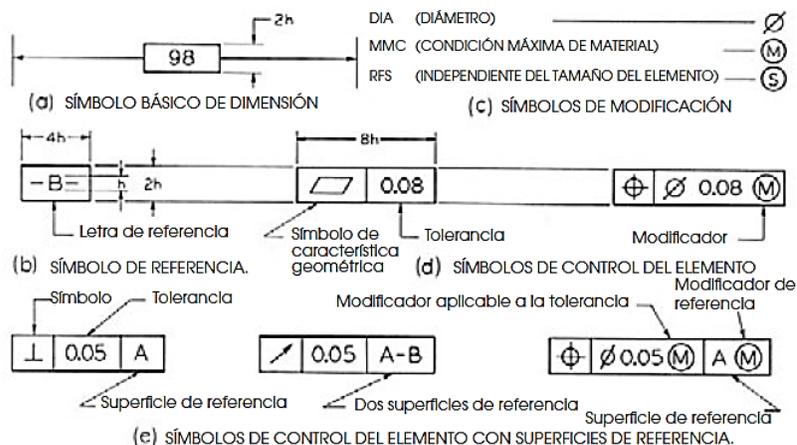


Figura 2.3. Uso de símbolos para tolerancias de posición y forma basado en la norma ASME Y14.5M-1994. Fuente: Giesecke, Mitchell, & Spencer (2006).

2.1.3 SolidWorks, software CAD

Un ejemplo claro de software CAD es *SolidWorks*. SolidWorks es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable (González, 2010).

2.1.3.1 Características de SolidWorks

La **Definición de parámetros clave**, la **Asociatividad**, las **Funciones geométricas inteligentes** y el **Gestor de diseño**, son las principales características de SolidWorks (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Características principales que contiene el software de diseño SolidWorks. Fuente: González (2010).

Característica	Descripción
<i>Definición de parámetros clave</i>	Son las dimensiones (cotas) y las relaciones geométricas que definen un modelo tridimensional.
<i>Asociatividad</i>	SolidWorks contiene tres módulos: Pieza , Ensamblaje y Dibujo . Cuando se dice que SolidWorks es asociativo quiere decir que todos los documentos (Pieza , Ensamblaje y Plano) están vinculados y que la modificación de un fichero de pieza modifica al ensamblaje y los planos asociados de forma automática, sin la participación del usuario. Para realizar un conjunto o ensamblaje se debe de diseñar cada una de las piezas que lo conforman y guardar como ficheros de pieza distintos. Finalmente, puede obtenerse los planos de las piezas o del propio ensamblaje de forma automática.
<i>Funciones geométricas inteligentes</i>	La creación de Taladros , Chaflanes , Redondeos , Vaciados o la creación de Nervios , entre otras operaciones son creadas de forma rápida, ágil, intuitiva y guiada.
<i>Gestor de diseño</i>	También es conocido como árbol de operaciones o FeatureManager . En él se incluye de forma histórica todas las operaciones que han sido necesarias efectuar para conformar la pieza durante su diseño; permite visualizar/ocultar operaciones, suprimirlas o eliminarlas, cambiar el color y modificar los parámetros de definición o dimensión de una cota de croquis u operación, y establecer nuevas relaciones de posición geométrica.

2.1.3.2 Módulos de SolidWorks



Figura 2.4. Módulos existentes en SolidWorks. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Como se mencionó en la Tabla 2.1, SolidWorks contiene tres módulos: **Pieza, Ensamblaje y Dibujo** (Figura 2.4). En cada uno de ellos se dispone de múltiples herramientas de *Productividad, Comunicación y Análisis-simulación*.

El **Módulo de Pieza** (Figura 2.5) constituye un entorno de trabajo para diseñar modelos mediante el empleo de herramientas de diseños de operaciones ágiles e intuitivas. El conjunto de funciones e iconos permiten crear modelos tridimensionales (3D) partiendo de geometrías de croquis (2D) y obtener sólidos, superficies, estructuras metálicas, piezas de chapa, etc.

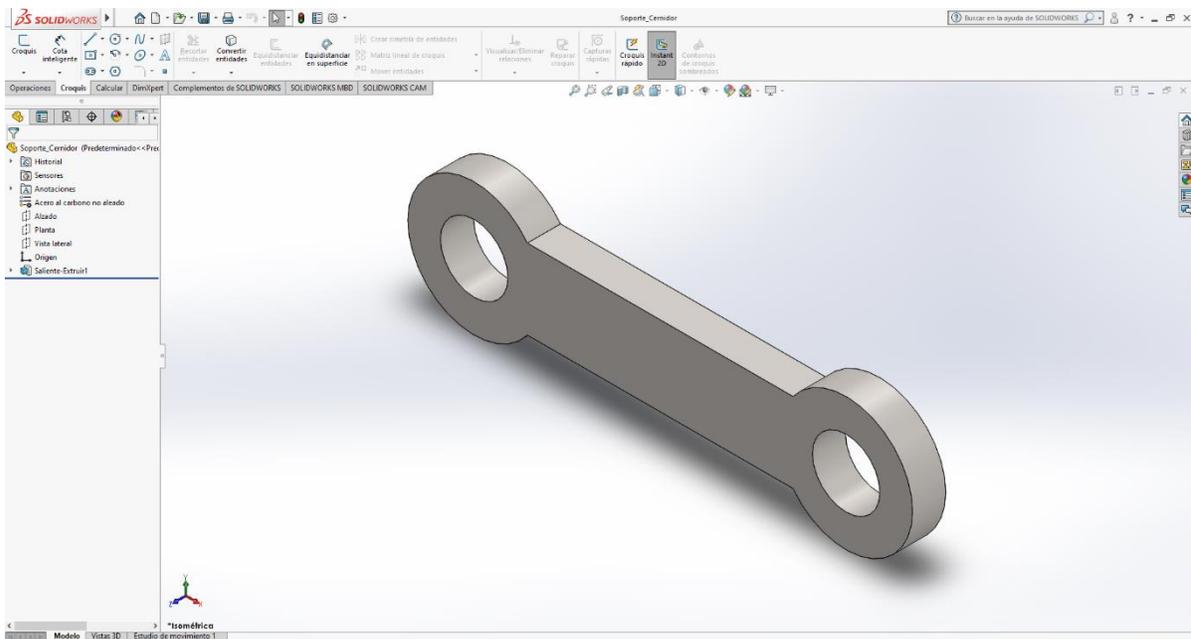


Figura 2.5. Entorno de trabajo del Módulo de Pieza en SolidWorks 2018. Fuente: SolidWorks - Elaboración Propia (2022).

El **Módulo de Ensamblaje** está formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos o ensamblajes mediante la inserción de los modelos 3D creados en el Módulo de Pieza. Los ensamblajes se definen por el establecimiento de **Relaciones geométricas** entre las piezas integrantes (González, 2010).

El **Módulo de Dibujo** permite crear planos con las vistas de los modelos o ensamblajes de forma automática y en muy poco tiempo ya sean vistas estándar, secciones y cortes, perspectivas, acotación, lista de materiales, entre otras funciones.

2.1.4 Ensamble de piezas en SolidWorks

Todas las máquinas y mecanismos se componen de diferentes partes. Un dibujo que muestra al producto en su estado final se llama **dibujo de ensamble**. La Figura 2.6 muestra el entorno de trabajo del módulo de ensamblaje en SolidWorks 2018.

Los dibujos de ensamble varían mucho en la cantidad y tipo de información que proporcionan, en función de la naturaleza de la máquina o mecanismo que describen. Las funciones principales

del dibujo ensamblado son mostrar el producto en su forma final, indicar la relación de sus distintos componentes, y designar a éstos con un número de parte o detalle (Jensel, D. Helsel, & R. Short, 2004). También se incluyen las dimensiones del conjunto, de capacidad, dimensiones relacionales entre partes, instrucciones de operación y datos de las características del diseño.

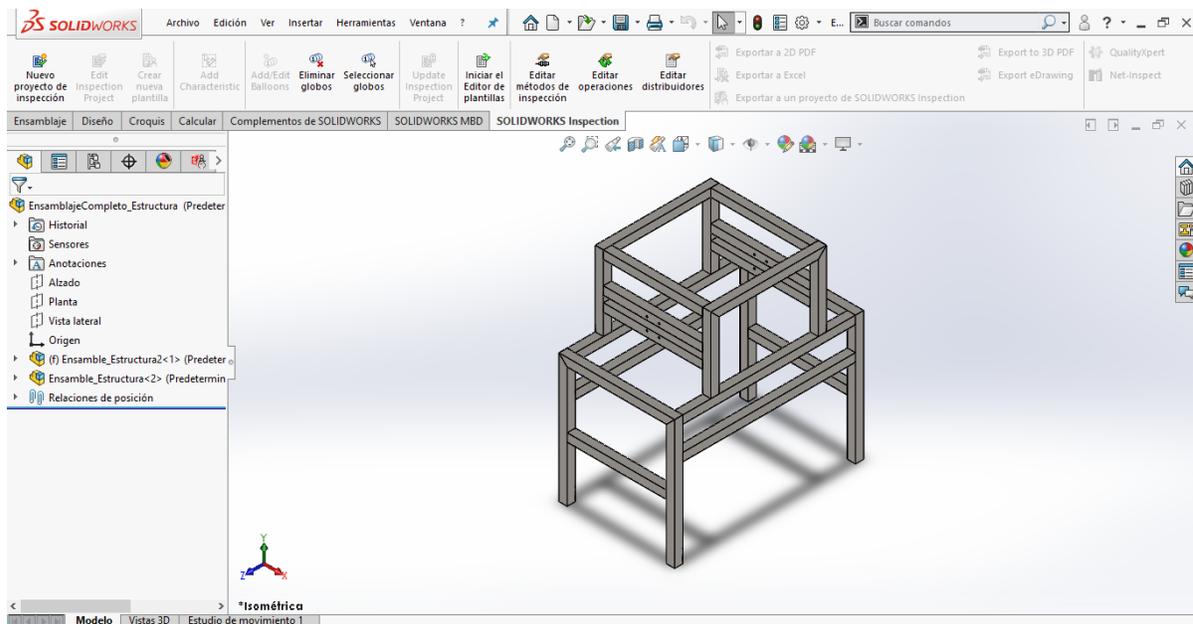


Figura 2.6. Entorno de trabajo del Módulo Ensamblaje de SolidWorks 2018. Fuente: SolidWorks - Elaboración Propia (2022).

El **análisis de un ensamblaje** permite analizar las posibles interferencias o choques entre los componentes móviles insertados, así como simular el conjunto mediante motores lineales, rotativos, resortes y gravedad, y evaluar la correcta cinemática del conjunto. (González, 2010)

Un ensamblaje de SolidWorks es un archivo que lleva la extensión *.sldasm* y su creación consta de dos etapas. En la primera las piezas son importadas al **Módulo de Ensamblaje** y en la segunda se establecen las **Relaciones Geométricas** de posición entre cada una de ellas. Las relaciones que se definen son del tipo *Coincidencia*, *Tangencia*, *Concentricidad*, etc. y se definen entre las *Caras*, *Superficies*, *Aristas*, *Vértices*, etc. de dos o más piezas. De esta forma, se puede montar un conjunto mecánico y, además, analizarlo por el movimiento de cada uno de los componentes en función de las relaciones de posición impuestas y de los grados de libertad restantes.

Existen dos métodos de diseño distintos: El **Método de diseño Ascendente** o **Descendente**.

2.1.4.1 Método Ascendente

En este método los componentes son creados individualmente en el módulo de pieza e insertados en el Módulo de ensamblajes donde se establecen las relaciones de posición geométrica entre sus elementos de referencia. Es el método más usado cuando se conocen las características dimensionales y geométricas de los componentes que forman el ensamblaje y también cuando se prevea que no van a realizarse excesivas modificaciones de diseño a la pieza.

2.1.4.2 Método Descendente

Al contrario del método anterior, en este se comienza a diseñar cada una de las piezas que conformar el ensamblaje directamente desde el módulo. En él puede definir la geometría de cada pieza, su tamaño, las relaciones geométricas con el resto de las piezas y su levantamiento en 3D. Es un procedimiento recomendable cuando no se dispone de la información de detalle del conjunto a diseñar ni de sus componentes.

2.2 Análisis estático

Se supone que la mayoría de los cuerpos considerados en la mecánica elemental son rígidos. Un *cuerpo rígido* es aquel que no se deforma. Las estructuras y máquinas reales nunca son absolutamente rígidas y se deforman bajo la acción de las cargas que actúan sobre ellas; a pesar de ello, por lo general esas deformaciones son pequeñas y no afectan las condiciones de equilibrio o de movimiento de la estructura en consideración. No obstante, tales deformaciones son importantes en lo que se refiere a la resistencia a la falla de las estructuras y están consideradas en el estudio de la mecánica de materiales. (Johnston, 2017)

2.2.1 Fuerzas y momentos

Una *fuerza* representa la acción de un cuerpo sobre otro y se caracteriza por su punto de aplicación, magnitud y dirección. Las fuerzas que actúan sobre los cuerpos rígidos se pueden dividir en dos grupos: *fuerzas externas* y *fuerzas internas*.

1. Las **fuerzas externas** son aquellas que ejercen otros cuerpos sobre el cuerpo rígido en consideración. Son las responsables del comportamiento externo del cuerpo rígido, ya que producen que el cuerpo se mueva o aseguran que éste permanezca en reposo.
2. Las **fuerzas internas** mantienen unidas las partículas que conforman al cuerpo rígido. Si está constituido en su estructura por varias partes, las fuerzas que mantienen unidas a dichas partes también se definen como fuerzas internas.

Los efectos de las fuerzas dependen no sólo de sus magnitudes y direcciones, sino también de los *momentos* o pares de torsión que ejercen. Los giros de objeto como las ruedas de un vehículo, el cigüeñal de un motor y el rotor de un generador eléctrico resultan de los momentos de las fuerzas ejercidas sobre ellos. Si un objeto está en equilibrio, el momento con respecto a cualquier punto debido a las fuerzas actuantes sobre el cuerpo es igual a cero.

2.2.2 Esfuerzo

La supervivencia de muchos productos depende de la forma en que el diseñador ajusta el esfuerzo inducido por la carga para que sea menor que la resistencia en un punto de interés. En resumen, debe permitir que la resistencia exceda al esfuerzo por un margen suficiente, de manera que, a pesar de las incertidumbres, la falla no sea frecuente.

La *resistencia* (S) es una propiedad de un material o de un elemento mecánico que depende de la selección, el tratamiento y el procesamiento del material. Las resistencias son magnitudes de esfuerzos en los cuales ocurre algo de interés, como el límite de proporcionalidad, la fluencia desplazada o la fractura (G. Budynas & Nisbett, 2002). Hay muchos tipos de resistencia, entre los que se encuentran resistencia a la fluencia (S_y), resistencia última (S_u) y resistencia cortante (S_{xy}). Cuando se secciona un cuerpo sometido a cargas externas existe una distribución de fuerza que actúa sobre el área seccionada, la cual mantiene en equilibrio a cada segmento del cuerpo. La intensidad de esta fuerza interna en un punto del cuerpo se conoce como *esfuerzo* (Hibbeler, 2017).

La distribución de fuerza que actúa sobre la superficie es única y tendrá componentes en las direcciones normal y tangencial llamados *esfuerzo normal* (σ) y *esfuerzo cortante tangencial* (τ). Las unidades de esfuerzo son libras por pulgada cuadrada (psi) en el sistema inglés de unidades y newtons por metro cuadrado (N/m^2).

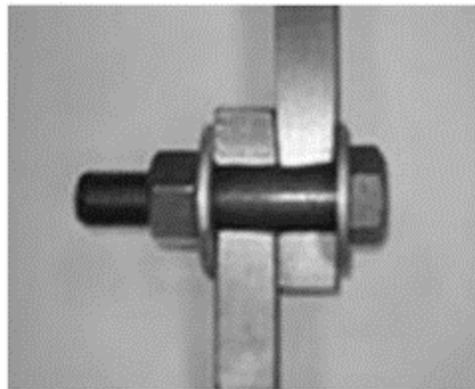


Figura 2.7. Vista en corte de una conexión con un perno en cortante. Fuente: Beer, P. (2010).

El *esfuerzo cortante*, V , es la fuerza cortante que se encuentra en el plano del área y se desarrolla cuando las cargas externas tienden a ocasionar que los dos segmentos del cuerpo se deslicen uno sobre el otro. Los esfuerzos cortantes se encuentran comúnmente en pernos, pasadores y remaches utilizados para conectar diversos elementos estructurales y componentes de máquinas. (Beer, 2010)

2.3.3 Deformación

Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, ésta tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo. Estos cambios se conocen como *deformación*, la cual puede ser visible o casi imperceptible. (Hibbeler, 2017)

La *deformación unitaria* es la cantidad geométrica que se mide mediante técnicas experimentales. Una vez obtenida, es posible determinar el esfuerzo en el cuerpo a partir de las relaciones entre las propiedades del material. Esta deformación puede ser normal o cortante. La *deformación unitaria normal* es una medida por unidad de longitud de la elongación o contracción de un segmento de línea pequeño en el cuerpo y su unidad básica es el metro (m),

siendo esta cantidad muy pequeña. En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería, las mediciones de la deformación unitaria se dan en micrómetros por metro (μ/m), donde $1\mu m = 10^{-6} m$. Por otro lado, la *deformación unitaria cortante* es una medida del cambio en el ángulo que se produce entre dos pequeños segmentos de línea que originalmente eran perpendiculares entre sí. Este ángulo se denota por γ (gama) y siempre se mide en radianes (rad), que son unidades adimensionales.

El *diagrama de esfuerzo-deformación* es un método para representar la relación entre el esfuerzo y la deformación en un material. Para obtener el diagrama de esfuerzo-deformación de un material, comúnmente se lleva a cabo un ensayo o prueba de tensión sobre una probeta del material. La Figura 2.8 representa ejemplos de este tipo de diagrama.

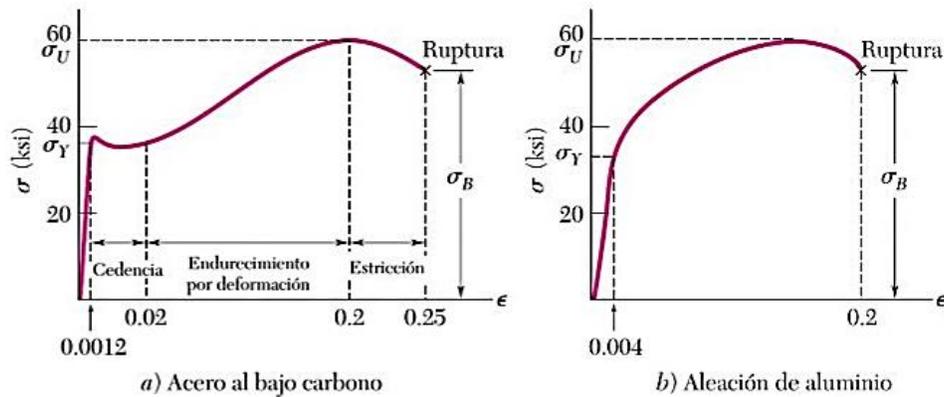


Figura 2.8. Diagramas esfuerzo-deformación de dos materiales dúctiles típicos. Fuente: Beer, P. (2010).

2.2.3 Teoría de la energía de distorsión para materiales dúctiles

La *Teoría de la Energía de Deformación Máxima*, *Teoría de von Mises*, o *Teoría de la energía cortante* predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material. (G. Budynas & Nisbett, 2002)

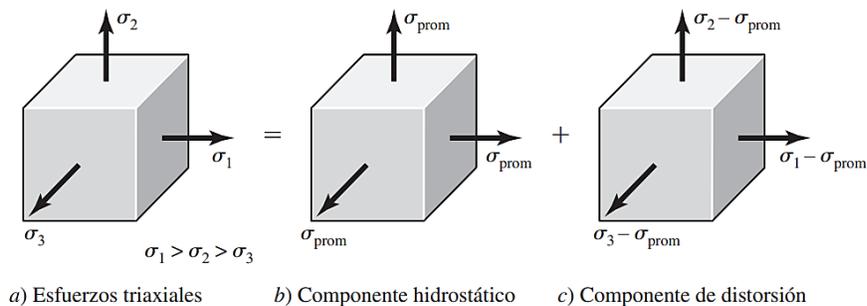


Figura 2.9. a) Elemento con esfuerzos triaxiales; este elemento experimenta cambio de volumen y distorsión angular, b) Elemento sometido a tensión hidrostática que solo experimenta cambio de volumen, c) Elemento con distorsión angular sin cambio de volumen. Fuente: G. Budynas & Nisbett (2002).

La teoría de la energía de distorsión se originó debido a que se comprobó que los materiales dúctiles sometidos a esfuerzos hidrostáticos (esfuerzos principales iguales) presentan resistencias a la fluencia que exceden en gran medida los valores que resultan del ensayo de tensión simple. Por lo tanto, se postuló que la fluencia no era un fenómeno de tensión o compresión simples, sino más bien, que estaba relacionada de alguna manera con la distorsión angular del elemento esforzado. Para desarrollar la teoría, observe en la Figura 2.9a, el volumen unitario sometido a cualquier estado de esfuerzos tridimensional, designado por los esfuerzos $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. El estado de esfuerzos que se muestra en la Figura 2.9b es de tensión hidrostática debida a los esfuerzos σ_{prom} que actúan en cada una de las mismas direcciones principales, como en la figura 8-b). La fórmula de σ_{prom} es simplemente:

$$\sigma_{prom} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

De esta manera, el elemento de la Figura 2.9b experimenta un cambio de volumen puro, es decir, sin distorsión angular. Si se considera σ_{prom} como un componente de σ_1, σ_2 y σ_3 entonces este componente puede restarse de ellos, lo que da como resultado el estado de esfuerzos que se muestra en la Figura 2.9c. Este elemento está sometido a distorsión angular pura, es decir, no hay cambio de volumen.

La energía de deformación por unidad de volumen de la tensión simple es $u = \frac{1}{2} \epsilon \sigma$. Para el elemento de la Figura 2.9a, la energía de deformación por volumen unitario $u = \frac{1}{2} [\epsilon_1 \sigma_1 + \epsilon_2 \sigma_2 + \epsilon_3 \sigma_3]$ se obtiene

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad \text{Ecuación 2.2}$$

La energía de deformación para producir solo cambio de volumen u_v puede obtenerse sustituyendo σ_{prom} para σ_1, σ_2 y σ_3 en la Ecuación 2.2. El resultado es

$$u_v = \frac{3\sigma_{prom}^2}{2E} (1 - 2\nu) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Si ahora se sustituye el cuadrado de la Ecuación 2.1 en la Ecuación 2.3 y se simplifica la expresión, se obtiene

$$u_v = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1) \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Entonces, la energía de distorsión se obtiene al restar la Ecuación 2.4 de la Ecuación 2.2. De aquí se obtiene

$$u_d = u - u_v = \frac{1 + \nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En caso de que $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, la energía de distorsión será cero.

Para el ensayo a tensión simple, en la fluencia, $\sigma_1 = S_y$ y $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ y de la Ecuación 2.5 la energía de distorsión es:

$$u_d = \frac{1 + \nu}{3E} S_y^2 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

En el caso del estado general del esfuerzo dado por la Ecuación 2.5, se predice la fluencia si la Ecuación 2.5 es igual o mayor que la Ecuación 2.6. Esto da

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq S_y \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Si se tuviera un caso simple de tensión σ , entonces la fluencia podría ocurrir cuando $\sigma \geq S_y$. Por lo tanto, el lado izquierdo de la Ecuación 2.7 puede considerarse como un *esfuerzo simple, equivalente o efectivo* del estado general total del esfuerzo dado por σ_1, σ_2 y σ_3 . Por lo general, este esfuerzo efectivo se llama *esfuerzo von Mises, σ'* , en honor del doctor R. von Mises, quién contribuyó a elaborar la teoría. Así, la Ecuación 2.7, de la fluencia puede escribirse como

$$\sigma' \geq S_y \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde el **esfuerzo Von Mises** es

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Para el esfuerzo plano, sean σ_A y σ_B los dos esfuerzos principales diferentes de cero. Entonces, de la Ecuación 2.9, se obtiene

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

La ecuación 2.10 es una elipse rotada en el plano σ_A, σ_B , como se muestra en la Figura 2.10 con $\sigma' = S_y$. Las líneas punteadas en la figura representan la teoría del ECM (Esfuerzo Cortante Máximo), que puede verse como más restrictiva y conservadora.

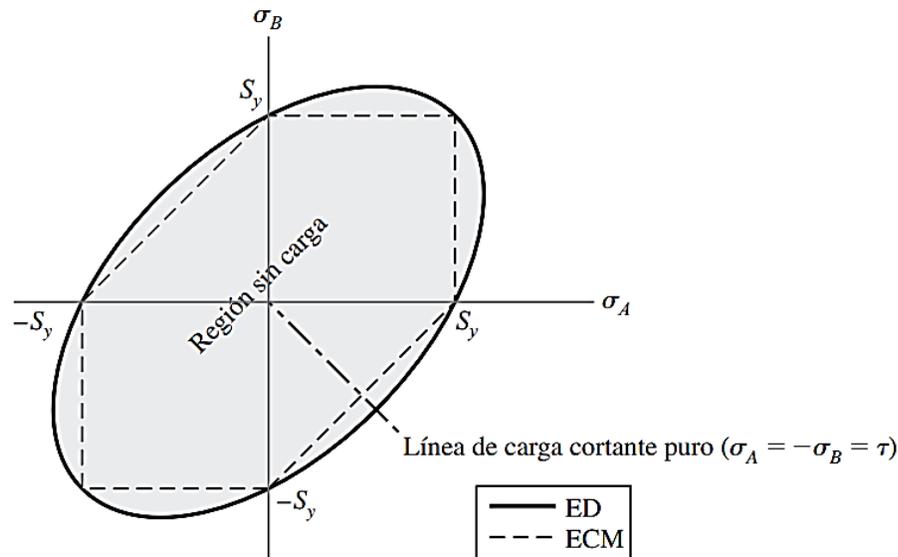


Figura 2.10. Teoría de energía de distorsión (ED) de estados de esfuerzo plano. Ésta es una gráfica real de puntos que se obtienen mediante la Ecuación 2.10 con $\sigma' = S_y$. Fuente: G. Budynas & Nisbett (2002).

Usando las componentes xyz del esfuerzo tridimensional, el esfuerzo de von Mises puede escribirse como

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Y para el esfuerzo plano

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

La manipulación matemática implicada en el desarrollo de la teoría de la energía de distorsión, a menudo tiende a oscurecer el valor real y la utilidad del resultado. Las ecuaciones dadas indican que una situación de esfuerzo complejo se puede representar por medio de un solo valor, el esfuerzo de von Mises, el cual puede compararse con la resistencia a la fluencia del material a través de la Ecuación 2.8. Esta ecuación se expresa como una ecuación de diseño mediante

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

2.2.4 Factor de seguridad

El *factor de seguridad* es una medida de la seguridad relativa de un componente bajo la acción de una carga. En la mayor parte de los casos, la resistencia del material con que se fabricará el componente se divide entre el factor de diseño para determinar un esfuerzo de diseño, σ_d , que a veces se llama esfuerzo admisible o esfuerzo permisible. Entonces, el esfuerzo real que se desarrolla en el componente debe ser menor que el esfuerzo de diseño. (Calderón Salcedo, 2020)

Hay muchas razones para restringir la carga aplicada a una que sea menor a la máxima carga que el elemento puede soportar, algunas de ellas son: (Hibbeler, 2017)

- Las medidas propuestas de una estructura o máquina pueden no ser exactas debido a errores en la fabricación o en el montaje de las piezas que lo componen.
- Pueden ocurrir vibraciones, impactos o cargas accidentales desconocidos que no hayan sido tomados en cuenta para el diseño.
- La corrosión atmosférica, el desgaste o la exposición a la intemperie tiende a causar que los materiales se deterioren durante su uso.
- Algunos materiales como la madera, el concreto o los compuestos reforzados con fibra, pueden tener una alta variabilidad en sus propiedades mecánicas.

Cuando no se cuenta con códigos o normas, el diseñador debe aplicar su juicio para especificar el factor de diseño adecuado. Parte de la filosofía de diseño, se refiere a asuntos como la naturaleza de las cargas sobre el componente que se va a diseñar, el análisis de esfuerzo, las propiedades del material y el grado de confianza en los datos que se emplean en el proceso de diseño. Todas estas consideraciones afectan la decisión acerca de qué el valor del factor de diseño es el adecuado; en la Tabla 2.3 se muestran algunos lineamientos con respecto al uso del factor de seguridad.

Tabla 2.2. Factores de seguridad. Fuente: Salcedo (2020).

<i>N</i>	<i>Empleos</i>
1.25 a 2.0	Diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que haya un alto grado de confianza en todos los datos de diseño.
2.0 a 2.5	Diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño.
2.5 a 4.0	Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
4.0 o más	Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas, propiedades de material, análisis de esfuerzo o el ambiente. El deseo de dar una seguridad adicional a componentes críticos puede justificar también el empleo de estos valores.

2.3 Método del elemento finito

Cuando se requiere encontrar una descripción cuantitativa de un fenómeno físico se comienza planteando un conjunto de ecuaciones para caracterizar el comportamiento físico de dicho problema. Estas ecuaciones, por lo general, consisten en un sistema de ecuaciones diferenciales o derivadas parciales, en una determinada *región* o *dominio* (medio continuo) y las ecuaciones de contorno o iniciales.

Dentro de cada elemento, se distinguen una serie de puntos llamados *nodos*. Se define al conjunto de *nodos* (considerando sus relaciones de adyacencia) como *mall*a. Los cálculos son realizados sobre una *mall*a o *discretización* (partición del *dominio*) creada a partir del dominio con programas especiales.

Para resolver este sistema de ecuaciones para un conjunto dado de datos solo es posible resolverlas (analíticamente), si estas ecuaciones son muy simples y si están definidas en un *dominio* de simple geometría. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se conoce con el nombre de matriz de rigidez del sistema o Hipermatriz. (Vásquez, 2009)

De lo antes mencionado, se tiene que el número de ecuaciones del sistema es proporcional al número de nodos.

$$a_1x_1 + b_1x_2 + c_1x_3 = d$$

$$e_1x_1 + l_1x_2 + g_1x_3 = h$$

$$i_1x_1 + j_1x_2 + k_1x_3 = l$$

a)

$$\begin{pmatrix} a & b & c \\ e & f & g \\ i & j & k \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} d \\ h \\ l \end{pmatrix}$$

b)

c)

d)

Ecuación 2.14. a) Sistema de ecuación lineal, b) Hipermatriz, c) Solución, d) Resultado.

Con el uso del ordenador, se replantea el problema de una manera puramente algebraica. Ahora, el conjunto de números que representa a dicha función (o varias funciones) sería de solución desconocida y serían reemplazado por un número finito de parámetros desconocidos. En este caso, el proceso requiere el empleo de una forma de aproximación. Una de las formas más simples de discretización posibles, es el *proceso de diferencias finitas*.

2.4 Análisis estático y del elemento finito mediante software CAD

2.4.1 Ingeniería Asistida por Computadora (CAE)

La *Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés)* simula bajo condiciones aparentemente reales el efecto de variables sobre el elemento diseñado con el fin de llegar a una forma geométrica optimizada para ciertas condiciones. Es un modelo interactivo tridimensional en tiempo real con análisis mediante pruebas no destructivas ideal para verificar la factibilidad de distintas alternativas de diseño. (Rojas Lazo & Rojas Rojas, 2006)

El *método de elementos finitos (FEM, Finite Element Method)* ha ayudado a disminuir la cantidad de prototipos necesarios, fijar ciertos valores de referencia, coeficientes de seguridad y analizar distintas opciones de diseño cambiando la geometría o el material en un tiempo reducido. El FEM está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculos complejos en 2 y 3 dimensiones. En muchas ocasiones, es de uso indispensable.

Los resultados obtenidos en los softwares CAD/CAE son aproximaciones por funciones de prueba (método aproximado desde múltiples perspectivas: interpolación, discretización, utilización de métodos numéricos) y dependen de cómo se divida la estructura en elementos finitos (el tiempo de resolución del problema se incrementa geométricamente con la cantidad de elementos). A pesar de la denominación de aproximado, el método de elementos finitos es una herramienta que permite realizar una gran cantidad de análisis en estructuras y componentes complejos, que difícilmente se obtiene por los métodos analíticos clásicos. Sin embargo, también los materiales presentan imperfecciones (fisuras, incrustaciones, rugosidad superficial) y sus propiedades pueden variar por zonas (variaciones de densidad, dureza, distintas orientaciones de los granos de la misma pieza, tensiones remanentes de temple, etc.) lo que puede conllevar a errores no definidos.

2.4.2 Análisis por Elementos Finitos (FEA)

Aunque el nombre de FEA se ha establecido por los años 1960, el concepto se ha usado desde hace varios siglos. El empleo de métodos de discretizado espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas en ciencia aplicada e ingeniería es conocido desde la antigüedad en la construcción de las pirámides egipcias y en los últimos años muy desarrollado y aprovechado por las industrias.

El concepto básico del *análisis por elementos finitos* para una estructura radica en sustituir la estructura continua real por una estructura idealizada equivalente compuesta por un número finito de partes discretas (puntos interconectados entre sí llamados nodos y al conjunto se le conoce como malla) por medio de un entallado (bidimensionales; cuadriláteros y triángulos; tridimensionales: heladeros y tetraedros), al cual se aplican cargas en los nodos de los elementos límite del modelo (Figura 2.11), después del cual empleando teoremas de energía (relación entre fuerzas actuantes entre los nodos y sus desplazamientos - Ley de Hooke, módulo de Young,

módulo de Poisson, etc.), se llega a derivar una matriz de rigidez (las ecuaciones que rigen el comportamiento de la malla regirán también para la estructura). De esa forma, se consigue pasar de un sistema continuo (infinito grados de libertad), que es regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito.

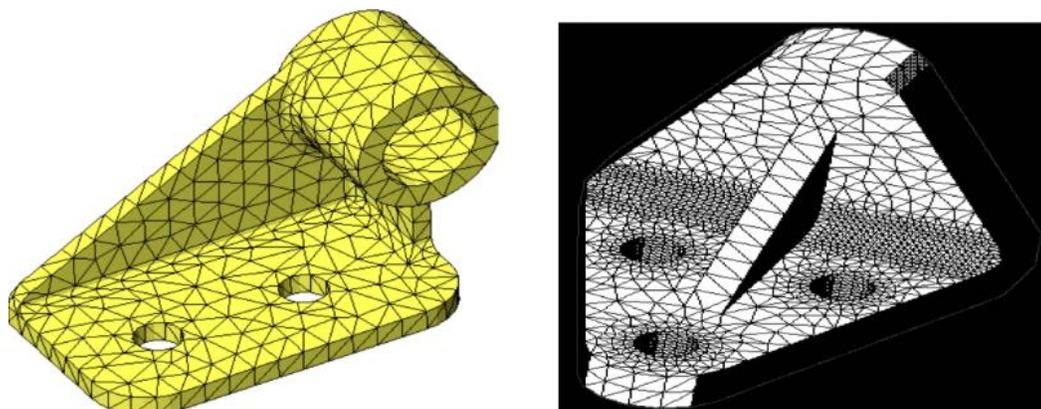


Figura 2.11. Modelos tridimensionales paramétricos. Fuente: Rojas Lazo & Rojas Rojas (2006).

Tabla 2.3. Análisis comunes aplicando FEA. Fuente: Rojas Lazo & Rojas Rojas (2006).

	<i>Análisis</i>	<i>Detalle</i>
<i>a.</i>	<i>Propiedades físicas, térmicas y mecánicas</i>	Resistencia, tamaño, volumen, peso, densidad, centro de gravedad, centro de rotación, transferencia de calor, conductividad térmica, electromagnetismo, plasticidad, flujo hidráulico, acústica, etc.
<i>b.</i>	<i>Mecanismos</i>	Movimientos, ensambles, interferencias, conexiones, cargas estáticas y dinámicas, etc.
<i>c.</i>	<i>Funcional</i>	Cumple con las especificaciones funcionales.
<i>d.</i>	<i>Factores humanos</i>	Necesidades físicas, mentales, seguridad y medidas ergónomicas.
<i>e.</i>	<i>Estético</i>	Apariencia y percepción, forma, presentación, color, textura, etc.
<i>f.</i>	<i>Mercado</i>	Preferencias, satisfacción, calidad, precio, presentación, etc.
<i>g.</i>	<i>Financiero</i>	Inversiones, presupuesto, costos, precio, etc.

El procesador FEM genera una voluminosa cantidad de datos (archivos pesados) los cuales son postprocesados por las herramientas de visualización de displays gráficos (rendering foto realista con una escala de colores, animaciones, esquemas, etc.) para mostrar esfuerzos internos y con los desplazamientos se obtiene las deformaciones (relacionadas directamente con las tensiones). En la etapa de postproceso se puede ver las magnitudes y localizaciones de las deformaciones en cualquier instante y en cualquier parte del modelo, así como los distintos rasgos de tensión representados por un mismo color lo que permite evaluar rápidamente las zonas críticas de diseño y analizar si la pieza soporta la tensión admisible del material sin deformarse más de lo permitido por el diseño (zona elástica).

En la Tabla 2.4 se muestran los análisis comunes realizados con esta técnica y en la Tabla 2.5 se presenta en el procedimiento general que siguen los softwares que aplican la técnica de los elementos finitos.

Tabla 2.4. Procedimiento general para el cálculo de elementos finitos. Fuente: Rojas Lazo & Rojas Rojas (2006).

Procedimiento	Vista
a. Determinar el fenómeno físico o problema a resolver y definir sus características.	
b. Modelado geométrico del objeto (elaborado en un sistema CAD). Ejemplo: una viga rectangular	
c. Trazado de las cargas que actúan sobre el objeto (concentradas o distribuidas).	
d. Selección de las condiciones de equilibrio o restricciones (constraints).	
e. Selección del material y sus propiedades.	
f. Selección y/o trazado del enmallado.	
g. Correr el programa.	
h. Representar los resultados (gráficos y cuadros).	
i. Optimización del resultado (mejorar peso, tamaño, tensiones y deformaciones).	
j. Desarrollo de la solución factible.	

2.4.3 SolidWorks Simulation para Análisis Estático por Elementos Finitos

SolidWorks Simulation es una herramienta de validación de diseño integrada en SolidWorks que permite simular el comportamiento de piezas y ensamblajes mediante la aplicación del **Análisis por Elementos Finitos (FEA)**. Al estar integrada en SolidWorks puede modificar la geometría del modelo 3D y volver a ensayarlo bajo diferentes condiciones de contorno (distintos materiales, cargas, mallado, etc.) tantas veces como sea necesario hasta encontrar el modelo que mejor se ajuste a las necesidades requeridos.

SolidWorks Simulation puede realizar los siguientes tipos de estudios: Estático, Estudio de frecuencia, Pandeo, Térmico, Caída, Fatiga, No lineal, Dinámica lineal o Diseño de recipiente a presión. Para fines de este proyecto se ahondará únicamente en el Análisis Estático.

2.4.3.1 Análisis Estático

El *Análisis Estático* permite conocer cómo se deforma el modelo ensayado bajo la acción de cargas y cómo éstas se transmiten a través de este. (Gómez González, 2015)

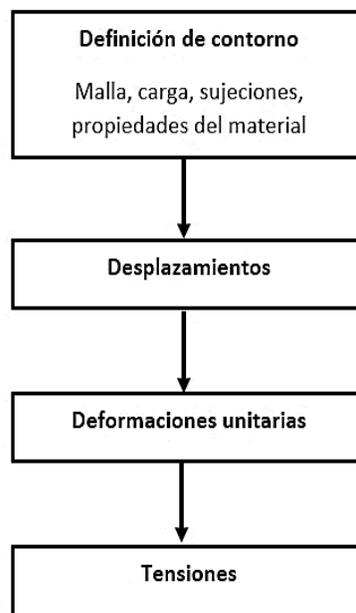


Figura 2.12. Diagrama de las etapas para realizar un análisis estático en SolidWorks. Fuente: Gómez González (2015).

El análisis calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción que se producen sobre el modelo estudiado cuando se somete a la acción de cargas y a restricciones de movimiento (las llamadas sujeciones). Así mismo, el análisis estático no tiene en cuenta las fuerzas inerciales y supone un comportamiento lineal en el material simulado.

La simulación permite evaluar el **Factor de Seguridad (FS)** y rediseñar el modelo para evitar el fallo en las zonas en las que se tienen elevadas tensiones. Un factor de seguridad inferior a la unidad indica una falla en el material; esta se representa con un color rojo al post-procesar.

Las principales propiedades mecánicas que debe tener en cuenta en un análisis estático son: *Densidad, Tensión, Tensión de Von Mises, Deformación unitaria, Módulo de elasticidad, Límite elástico y el Factor de Seguridad.*

La aplicación del Análisis Estático de una pieza mediante SolidWorks Simulation se realiza mediante la aplicación de un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio en cada uno de los elementos finitos establecidos por el mallado del sólido. El cálculo inicial del análisis estático determina los desplazamientos de cada uno de los nodos.

Las etapas de realización de un análisis se muestran en la Figura 2.12. Inicialmente se debe mallar el modelo para posteriormente definir las propiedades mecánicas del material, las restricciones de movimiento y las cargas a las que se desea someterlo.

1. **Mallado del modelo** de pieza o ensamblaje antes de realizar el análisis. Cualquier modificación en la geometría de este, así como en el cambio de alguna de las condiciones de contorno definidas, exigen una nueva definición del mallado.
2. **Propiedades del material.** El material por utilizar se define desde la biblioteca de materiales o crear uno nuevo.
3. **Asignación de sujeciones.** Las sujeciones definen la forma en la que el modelo está posicionado y anclado en el entorno; esto se logra seleccionando las caras o aristas del modelo que tendrán un movimiento restringido. Algunos ejemplos de sujeciones incorporadas en SolidWorks son: *fija* (restringe el movimiento de los elementos), *rodillo*, *de deslizamiento*, *utilizar geometría de referencia*, *simetría*, entre otras.
4. **Asignación de cargas.** Estas pueden ser fuerza, presión, gravedad, etc., y se aplican al modelo simulado.

2.5 Estado del Arte

2.5.1 Productos similares existentes

Domínguez, M. y Jaen, A. en su artículo “*Análisis numérico del mecanismo de una trituradora de PET mediante el método de elementos finitos*” presentan un análisis de los elementos mecánicos que constituyen una trituradora de plástico PET en donde se considera la influencia de la fuerza de oposición al corte del plástico en las cuchillas de corte y el eje rotatorio. El objetivo se centra en corroborar la factibilidad del uso de un eje rotatorio hexagonal junto con las cuchillas de corte y que no se presentarán fallas estructurales en el sistema. El estudio se realiza mediante experimentación numérica con un software de elemento finito considerando los elementos del sistema de acero general. Los resultados muestran los esfuerzos presentes en los elementos de corte y el eje hexagonal debido al giro y fuerzas resistivas generadas por el PET, por lo que de acuerdo con los resultados obtenidos los elementos cuentan con un factor de seguridad de 1.5 por lo que se comprueba que las piezas no fallaran bajo condiciones de trabajo normales (Domínguez Gurría, Jaen Rendón, Garibaldi Rodríguez, & Vladimir, 2021)

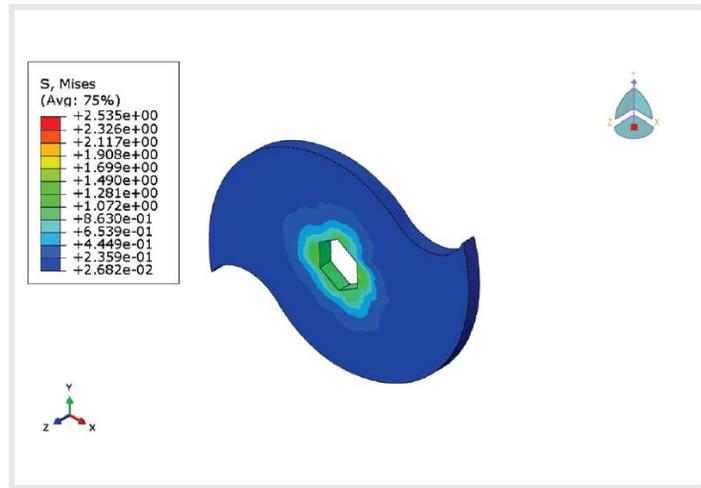


Figura 2.13. Análisis estático de la cuchilla de corte para una trituradora de PET. Fuente: Domínguez Gurriá, Jaen Rendón, Garibaldi Rodríguez, & Vladimir (2021).

Calderón A. presenta en su investigación el diseño de una máquina cernidora de arena verde, con la finalidad de mejorar el proceso de cernido e incrementar el nivel de producción. La validación de la concordancia entre los jueces para la ejecución de diagnóstico en campo se realizó por medio del coeficiente de Kendall ($W > 0.14$) en el software IBM SPSS y se incrementó la producción en un 67% y 25% con la capacidad de arena verde cernidora de 400 kg/h.

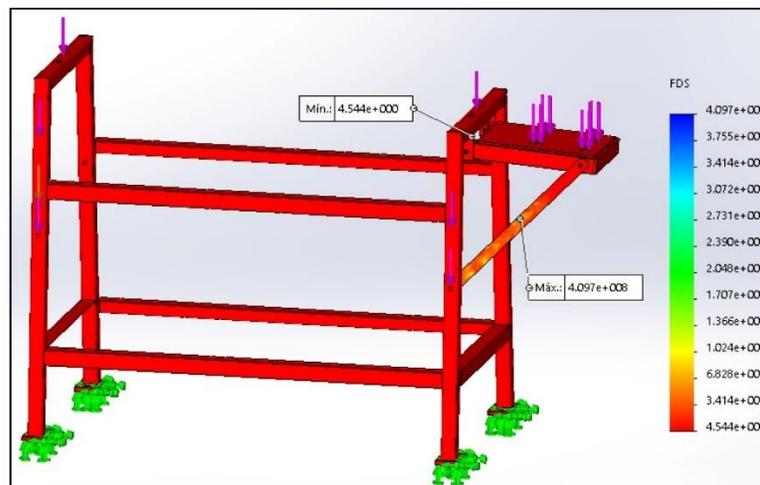


Figura 2.14. Análisis estático de la estructura de una máquina cernidora de arena verde en SolidWorks. Fuente: Calderón Salcedo (2020).

En su trabajo empleó la metodología del proceso de diseño, donde identifica los requisitos, funciones y criterios para evaluar de manera técnica-económica cada alternativa de solución propuesta, siendo la máquina cernidora rotativa inclinada impulsado por un motor la alternativa más viable. Mediante pruebas experimentales determinó que la densidad de arena verde es 161.74 kg/m^3 , el tamiz utilizado está basado en la norma ISO R-565 (empleados en la fundición)

luz 0.15 mm, el ángulo de inclinación es de 4. 1°, la velocidad óptima es 25 rpm con una potencia total de 0.37 kW, el eje de transmisión es de 44.45 mm y se utilizaron chumaceras tipo SYK 40WD y un acople SKF FRC 130. El trabajo de investigación incluye el diseño CAD y estudios CAE en el software de SolidWorks del eje con un análisis estático, fatiga y frecuencial, así como un análisis estático de la estructura para garantizar el correcto diseño y fiabilidad de los componentes (Calderón Salcedo, 2020).

García, O. y Guayasamín De La Cruz, V. en su trabajo de investigación presentan el diseño y construcción de una máquina trituradora-tamizadora que facilitará la preparación de la arcilla de la parroquia La Victoria, donde los alfareros acostumbran a realizar este proceso de forma manual. Se procedió a evaluar todas las necesidades que los alfareros requieren en la preparación y se logra proponer la mejor alternativa de diseño y construcción de una máquina semiautomática que facilitará el trabajo y tiempo utilizados en este proceso. Con una capacidad de trabajo de 100kg/h la máquina recibe la arcilla en forma de terrones, los tritura y tamiza para continuar con el siguiente proceso de mezcla. Para el dimensionamiento de la máquina se realizó el cálculo de la fuerza necesaria que necesitan realizar los martillos para desterronar la arcilla. Se utilizó el software Inventor para calcular los ejes que soporten la velocidad de giro y peso de los componentes. Mediante el programa SolidWorks se realizaron los planos de: martillos, ejes, estructura de la máquina (García Ayala & Guayasamín De La Cruz, 2020).

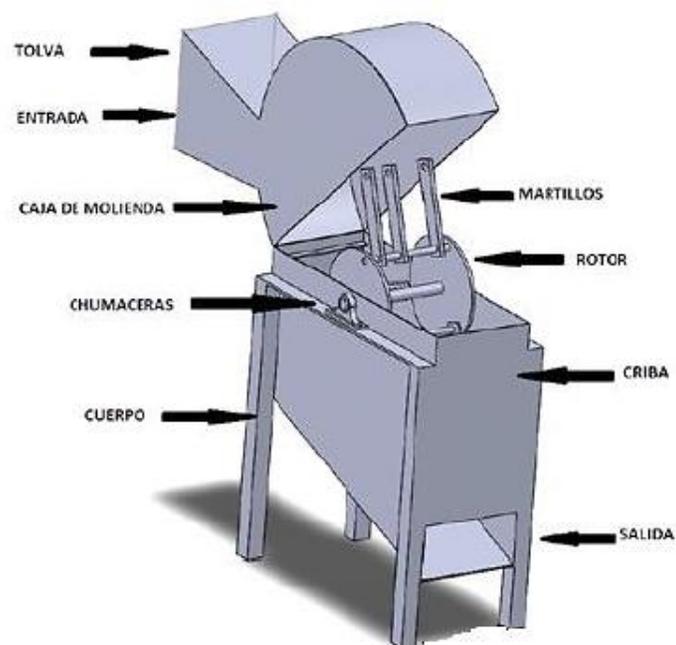


Figura 2.15. Partes de un molino de martillos móviles para una máquina trituradora-tamizadora. Fuente: García Ayala & Guayasamín De La Cruz (2020).

Capítulo 3 . Metodología.

3.1 Diseño de la estructura principal

3.1.1 Primer Diseño

Para el primer diseño de la estructura de la máquina se optó por realizar una sola pieza individual de la estructura, en vez de un ensamble, por lo que ambos niveles de la máquina, en donde se colocará el cernidor y la caja desterronadora, están diseñadas con base a las características de un perfil sólido de acero de 2in.

Para este diseño se recurrió a trabajar sobre diferentes croquis dentro del mismo dibujo y se trabajó de manera descendente, es decir, se comenzó con la parte que contendría a la caja desterronadora para posteriormente diseñar la estructura del cernidor.

- **ESTRUCTURA DEL DESTERRONADOR**

Para la estructura superior se comenzó diseñando dos rectángulos en 2D de 505 mm x 606.6 mm con una separación de 50.8 mm entre cada uno de ellos. Esta separación hace referencia a las medidas del perfil sólido de acero de 2in. Después del diseño 2D, se realizó una extrucción de 50.8 mm para formar una pieza en 3D.

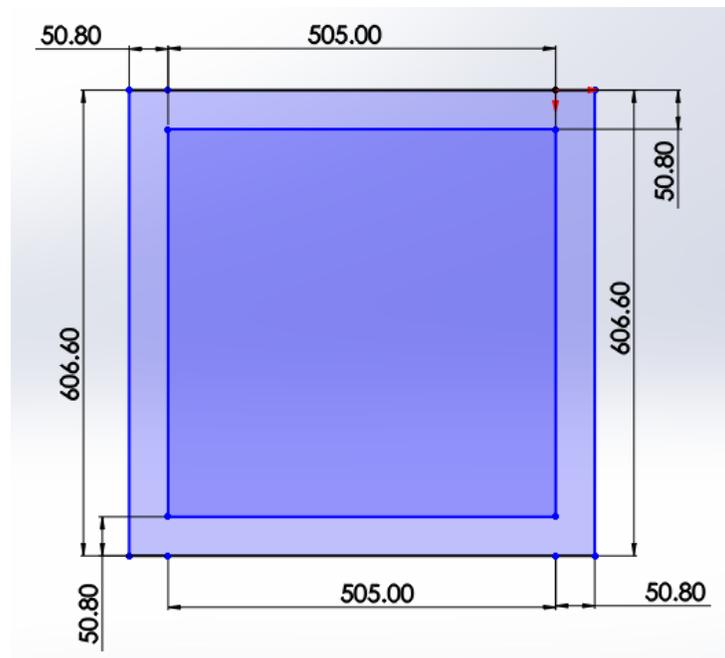


Figura 3.1. Primer diseño: Estructura superior en 2D. Fuente: Elaboración propia (2022).

Posteriormente, tomando como referencia las cuatro orillas de la Figura 3.1, se generó un nuevo croquis para dibujar sobre cada una de ellas un cuadrado de 50.8 mm x 50.8 mm con una extrucción de 350 mm.

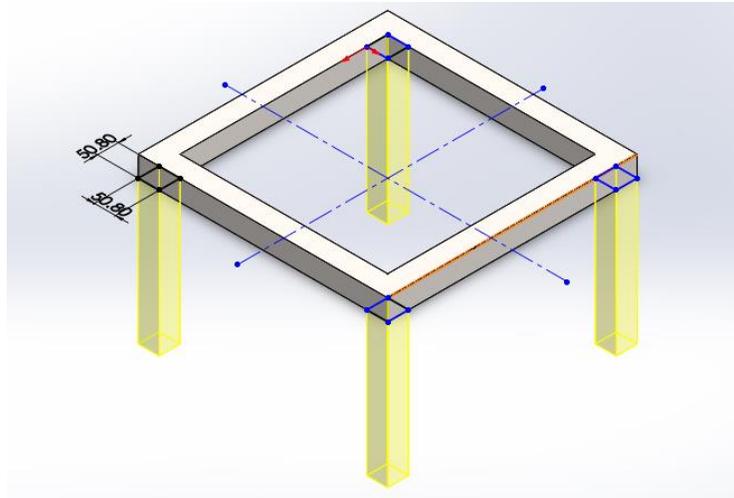


Figura 3.2. Primer diseño: Soportes de la estructura superior. Fuente: Elaboración propia (2022).

Por último, tomando como base los cuatro soportes de la Figura 3.2 y las medidas de la Figura 3.1, se dibujó en 2D otro cuadrado de 505 mm x 606.6 mm con una separación de 50.8 mm entre cada uno de ellos y una extrucción de 50.8 mm para formar una pieza en 3D.

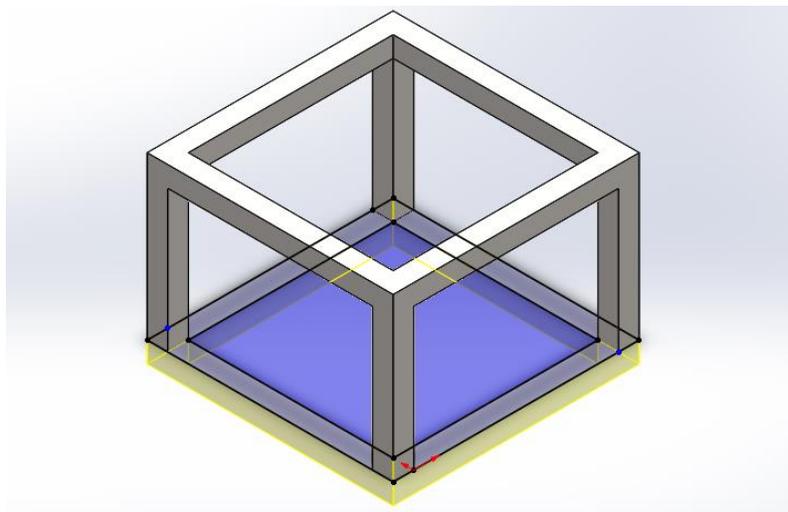


Figura 3.3. Primer diseño: Estructura superior en 3D terminada. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **ESTRUCTURA DEL CERNIDOR**

Para la estructura inferior, en donde iría colocado el cernidor, se creó un nuevo croquis sobre el perfil inferior de la estructura del desterrador. En este croquis se dibujaron dos rectángulos: el primero con medidas de 606.60 mm x 1056.60 mm y el otro con una separación de 50.8 mm respecto al primero (Figura 3.4).

Una vez generado el diseño en 2D, desde el menú de “Operaciones” de SolidWorks, se prosiguió a darle una extrucción al croquis de 50.8 mm, equivalente a 2in.

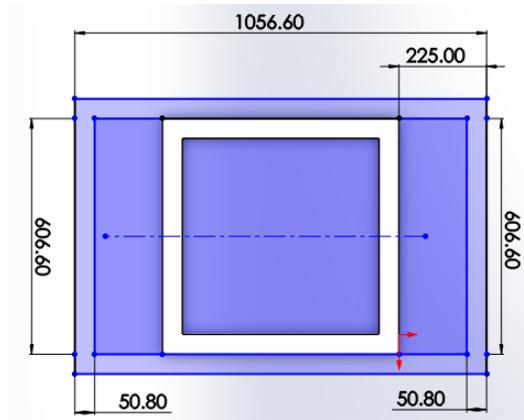


Figura 3.4. Primer diseño: Estructura inferior en 2D. Fuente: Elaboración propia (2022).

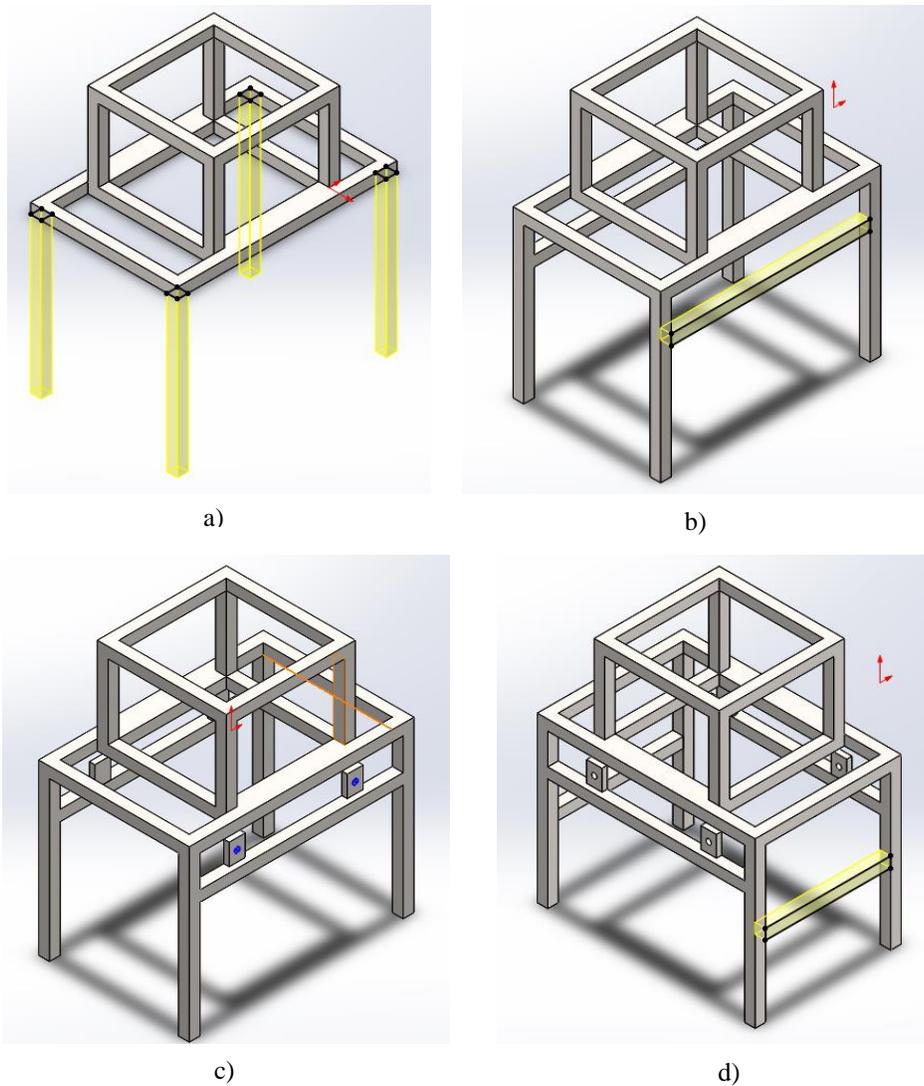


Figura 3.5. Primer diseño - Soportes de la estructura inferior: a) Soportes principales, b) Soportes secundarios frontales, c) Soportes terciarios frontales, d) Soportes secundarios laterales. Fuente: Elaboración propia (2022).

Posteriormente, tal y como para la estructura superior, se generó un nuevo croquis sobre la base ya extruida. En este croquis se dibujó un cuadrado de 50.8 mm x 50.8 mm y con una extrucción de 745.55 mm, los cuales representan los soportes de la estructura inferior (Figura 3.5-a)

Así mismo, en la parte frontal de la estructura se diseñaron otros dos soportes rectangulares de 955 mm x 50.8 mm x 50.8 mm (Figura 3.5-b) acompañados de dos soportes cuadrados de cada lado de 75 mm x 100 mm x 25.4 mm con una perforación circular de 25.4 mm de diámetro y una separación de 162.5 mm (Figura 3.5-c).

Por último, generó un nuevo croquis para diseñar los soportes laterales a la estructura (Figura 3.5-d) cuyas medidas son 606.6 mm x 50.8 mm x 50.8 mm a una distancia de 350 mm respecto a la base de la estructura inferior.

- **DEFINICIÓN DEL MATERIAL**

Para este primer diseño se consideró al “Acero galvanizado” como material base para la estructura y demás elementos de la máquina, como lo son las aspas, eje, etc. El **acero galvanizado** es un material muy denso con facilidad para soldar y de corte, moldeado y mecanizado moderado. Asimismo, dispone de un mayor peso, tenacidad; tiene una resistencia a la corrosión y a las temperaturas extremas; y dispone de una maquinabilidad superior. La tabla 3.1 muestra las propiedades del acero galvanizado.

Tabla 3.1. Propiedades del acero galvanizado. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e + 11	$\frac{N}{m^2}$
Coefficiente de Poisson	0.29	$\frac{N}{D}$
Densidad de masa	7870	$\frac{Kg}{m^3}$
Límite de tracción	356900674.5	$\frac{N}{m^2}$
Límite elástico	203943242.6	$\frac{N}{m^2}$

Estas propiedades se encuentran disponible en el software de SolidWorks cuando se define el material dentro del árbol de operaciones del diseño.

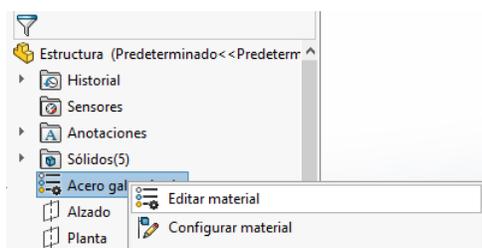


Figura 3.6. Comando para definir el material dentro de SolidWorks. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

3.1.2 Segundo Diseño

En este segundo diseño se modificaron las dimensiones de la estructura y se optó por realizar cada componente de manera individual para posteriormente llevar a cabo un ensamblaje ascendente para formar la estructura de la máquina.

De esta manera, se diseñó cada parte de la estructura de acuerdo con el tipo de material que se utilizaría en la construcción física por su fácil adquisición dentro del Estado de Puebla; este material es un PTR hueco de 2in. El material utilizado para fabricar el PTR es “Acero al carbón no aleado”, por lo tanto, también se modificó en el software de SolidWorks el material aplicado a las piezas diseñadas.

Tabla 3.2. Propiedades del acero al carbón no aleado. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.1e + 11	$\frac{N}{m^2}$
Coefficiente de Poisson	0.28	$\frac{N}{D}$
Modulo cortante	7.9e +10	$\frac{N}{m^2}$
Densidad de masa	7800	$\frac{Kg}{m^3}$
Límite de tracción	399826000	$\frac{N}{m^2}$
Límite elástico	220594000	$\frac{N}{m^2}$
Coefficiente de expansión térmica	1.3e-05	/K
Conductividad térmica	43	$\frac{W}{m * K}$

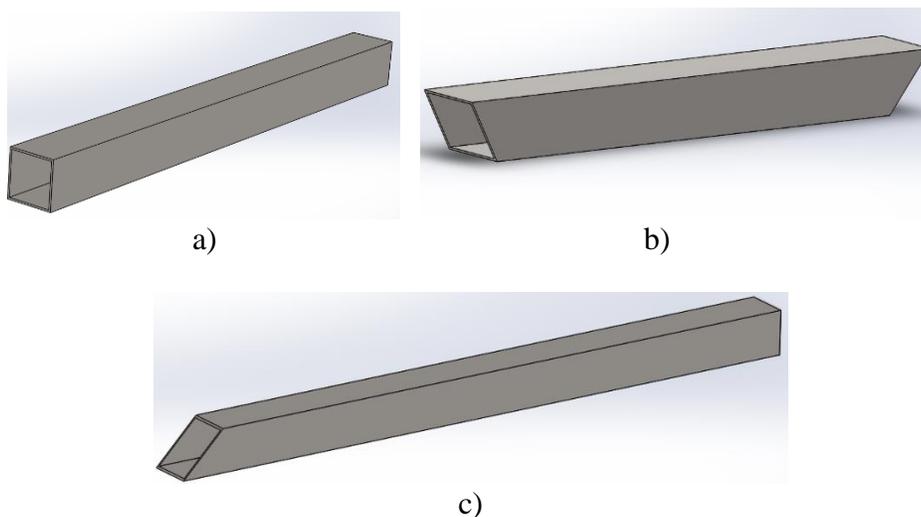


Figura 3.7. Componentes individuales de la estructura: a) Pieza con corte recto, b) Pieza con dos cortes a 45°, c) Pieza con un corte a 45°. Fuente: Elaboración propia (2022).

Debido a que cada pieza se iba a diseñar de manera individual para realizar el ensamblaje (y posteriormente soldarlas en el prototipo físico) se optó por realizar los diseños con cortes a 45° y 90° y, de esta forma, facilitar el ensamblaje. La Figura 3.7 muestra las tres variantes de diseño para conformar la estructura tanto superior como inferior.

Para diseñar estas piezas se tomó en cuenta las medidas estándares del PTR hueco de 2in que se encuentra en el mercado, variando así únicamente la medida del largo según las necesidades. Cada pieza es un rectángulo diseñado individualmente en un croquis de SolidWorks que mide 50.8 mm x 50.8 mm (2in x 2in) con una extrucción de corte de 46.8 mm x 46.8 mm, dejando así un grosor de 2 mm por cada lado de la pieza. La Figura 3.8 muestra las especificaciones antes descritas.

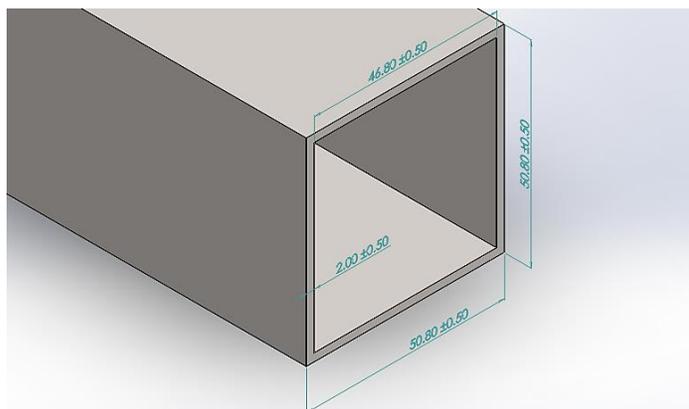


Figura 3.8. Medidas generales de cada pieza diseñada basadas en el material PTR a utilizar. Fuente: Elaboración propia (2022).

La tabla 3.3 y 3.4 muestra la longitud designada para las piezas y sus respectivos cortes (ya mostrados en la Figura 3.7), así como las cantidades utilizadas de cada una de ellas en los ensamblajes posteriores.

Tabla 3.3. Medidas de los componentes de la estructura inferior. Fuente: Elaboración propia (2022).

Estructura inferior		
Cantidad	Medidas	Cortes
2	71 cm	2 x 45°
4	79 cm	1 x 45°
4	105.84 cm	2 x 90°
2	60.84 cm	2 x 90°

Tabla 3.4. Medidas de los componentes de la estructura superior. Fuente: Elaboración propia (2022).

Estructura superior		
Cantidad	Medidas	Cortes
4	46 cm	1 x 45°
2	71 cm	2 x 45°
2	60.84 cm	2 x 90°

A continuación, se describen los ensamblajes realizados para conformar la estructura inferior y superior de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla.

- **DISEÑO DE LA ESTRUCTURA INFERIOR**

Para el diseño de la estructura inferior se creó un nuevo documento en SolidWorks desde el módulo de “Ensamblaje” (Figura 3.9).

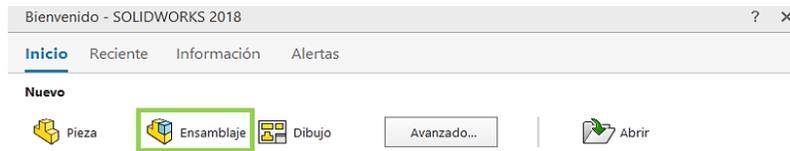


Figura 3.9. Selección del módulo “Ensamblaje” en SolidWorks 2018. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Como primer paso se agregaron las piezas especificadas en la Tabla 3.3. desde el menú “Ensamblaje” >> Insertar componentes.

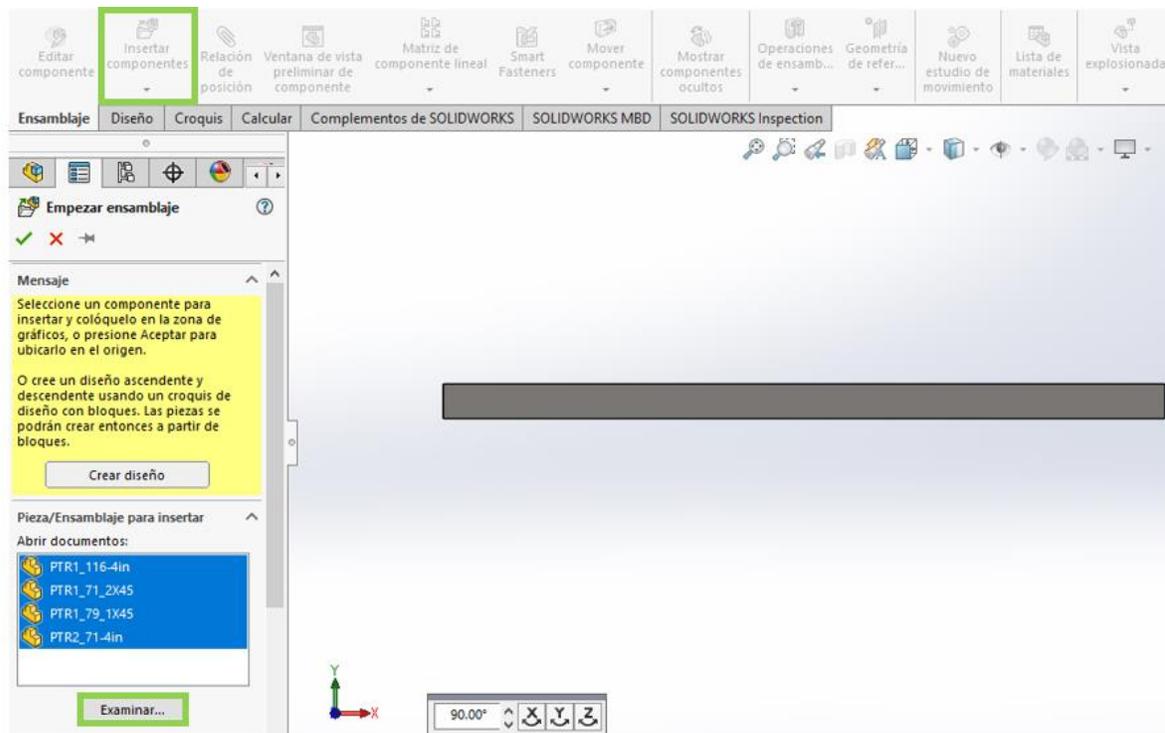


Figura 3.10. Las piezas utilizadas para ensamblar la estructura inferior se agregan desde la opción “Insertar componentes”. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Una vez insertadas todas las piezas se prosiguió a establecer las relaciones de posición correspondientes entre estas para así, conformar la estructura inferior.

Para este ensamble se utilizó la relación “Coincidente”; esta relación hace que dos caras planas se conviertan en coplanares. Las caras se pueden mover una a lo largo de la otra, pero son inseparables. La Figura 3.11 muestra un ejemplo de este tipo de relación en donde las caras y aristas de ambas piezas se establecen como coincidentes entre sí.

De esta forma, se utilizaron tantas relaciones como fueran necesarias para crear la forma de la estructura inferior (Figura 3.12), tomando como base el primer diseño elaborado.

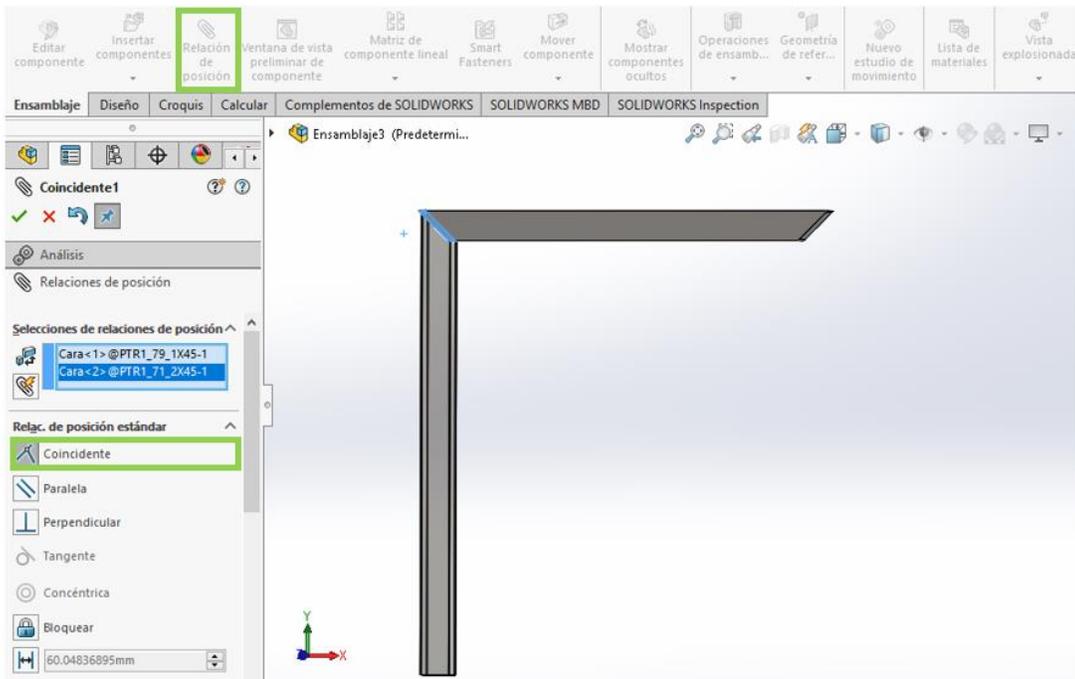
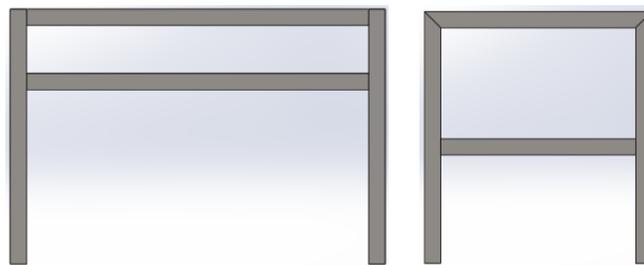
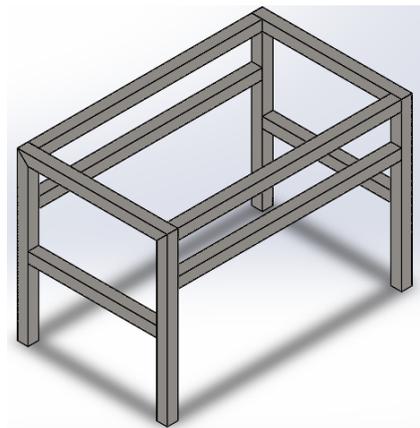


Figura 3.11. Definición de relaciones entre las piezas para conformar el ensamble final. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).



a)

b)



c)

Figura 3.12. Segundo diseño de la estructura inferior: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR**

Para el diseño de la estructura superior se siguieron los pasos descritos con anterioridad para la estructura inferior, pero utilizando las piezas correspondientes descritas en la Tabla 3.4.

La Figura 3.13 muestra la primera fase de este segundo diseño.

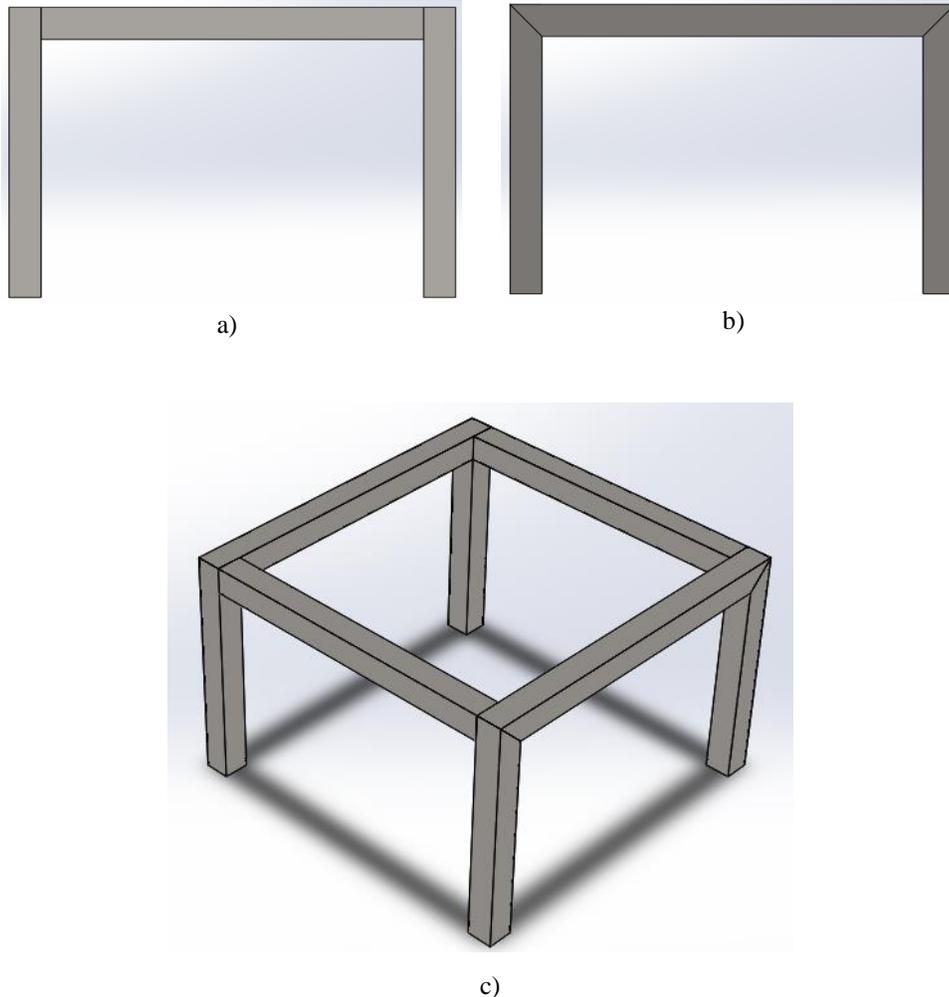


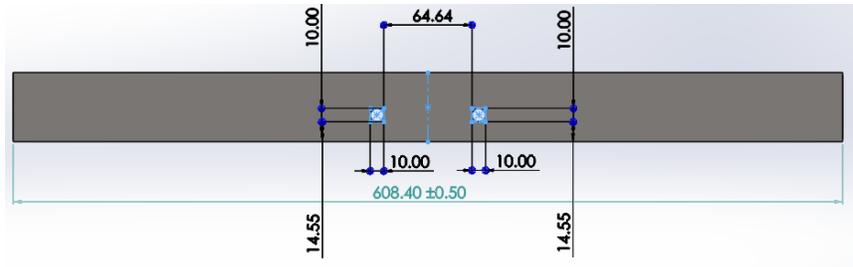
Figura 3.13. Segundo diseño de la estructura superior: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica.

Fuente: Elaboración propia (2022).

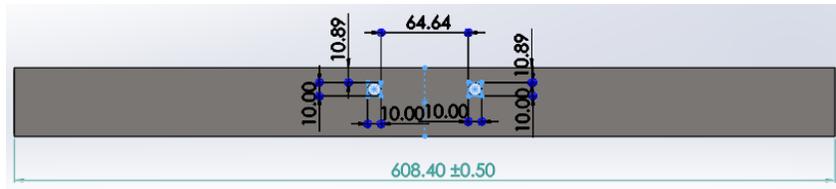
El segundo diseño de la estructura superior no estaba completo debido a que no contemplaba la manera en que se colocarían las chumaceras de pared que sujetarían al eje de la desterronadora.

Para ello, se prosiguió a crear dos nuevas piezas individuales de PTR de 60.84 cm con dos cortes rectos a los extremos y dos cortes circulares de 10 mm de diámetro tal y como se muestra en la Figura 3.14.

Para estos cambios, no se necesitó crear un archivo de ensamble nuevo, sino que se modificó el diseño de la Figura 3.13 agregando las piezas y relaciones de posición (tipo coincidente) faltantes al ensamblaje. El diseño dos de la parte superior de la estructura ya ensamblada se presenta en la Figura 3.15.

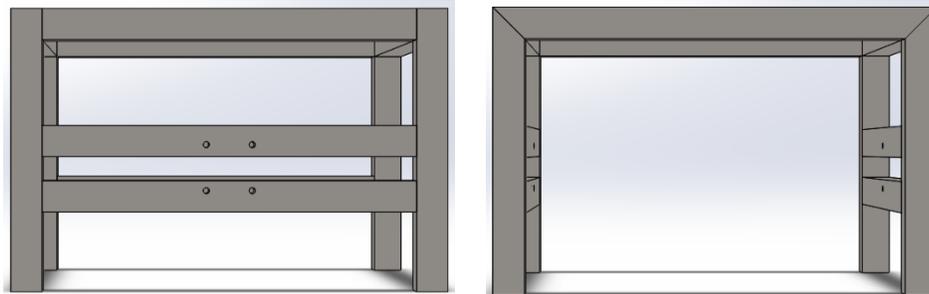


a)



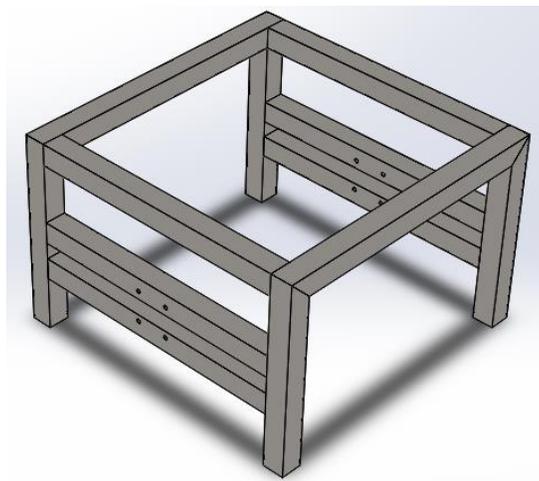
b)

Figura 3.14. PTR creado para sujetar la chumacera de pared: a) Pieza superior de sujeción de chumacera, b) Pieza Inferior de sujeción de chumacera. Fuente: Elaboración propia (2022).



a)

b)



c)

Figura 3.15. Segundo diseño de la estructura superior con soportes para chumaceras: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.1.3 Diseño Final

- **ESTRUCTURA INFERIOR**

El diseño dos de la estructura inferior no contemplaba los soportes del cernidor, por lo tanto, para el diseño final se diseñaron y añadieron estos elementos utilizando como base el diseño del PTR de 2in, variando únicamente su longitud a 148.40 mm (Figura 3.16)

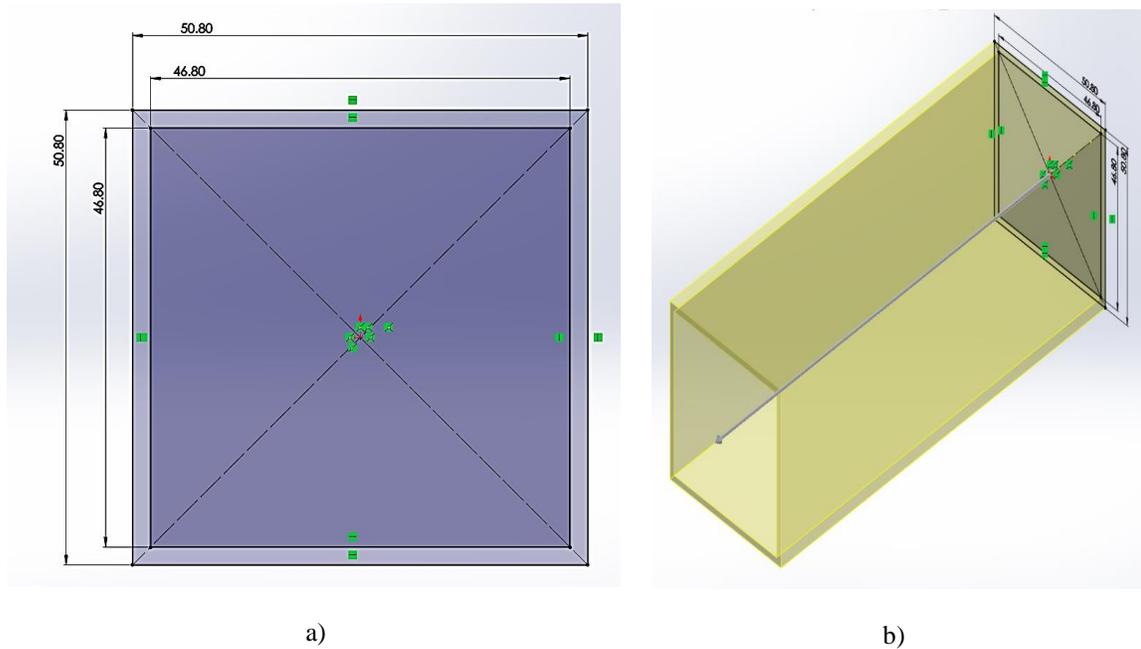


Figura 3.16. Diseño de los soportes a incorporar en la estructura inferior: a) Croquis del soporte PTR, b) Extrucción saliente de la pieza. Fuente: Elaboración propia (2022).

Además, se añadió una perforación circular de 25 mm de diámetro para la sujeción del cernidor tal como se muestra en la Figura 3.17.

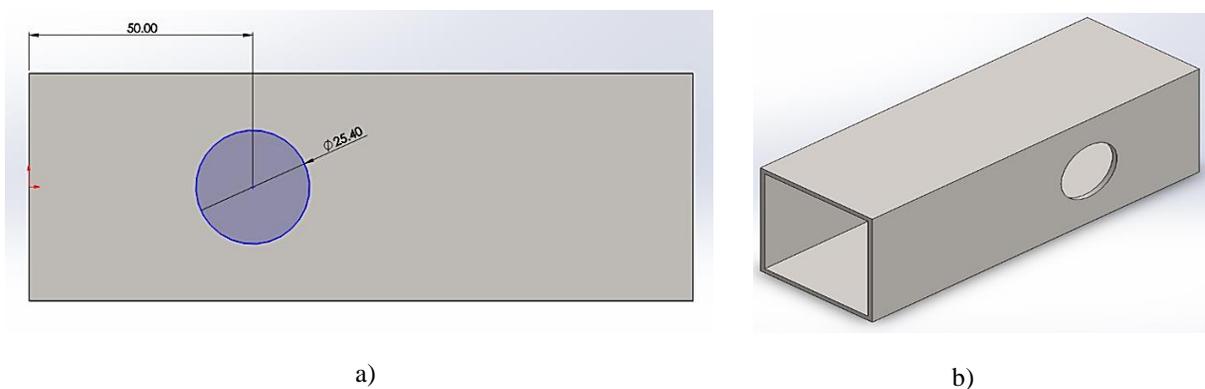


Figura 3.17. Extrucción corte circular a la pieza final del soporte: a) Croquizado 2D, b) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

Con el fin de dar una mayor presentación y diseño a la estructura, se diseñaron unas láminas rectangulares que funcionan como recubrimiento de la estructura inferior para que así los diferentes elementos que conforman la máquina no queden expuestos en su totalidad. Estas láminas se diseñaron individualmente respetando las medidas del diseño dos de la estructura inferior y contemplando el espacio destinado para el retiro de la materia prima (arcilla) una vez cernido. Las especificaciones de las láminas, tanto lateral como frontal, se muestran en la Figura 3.18.

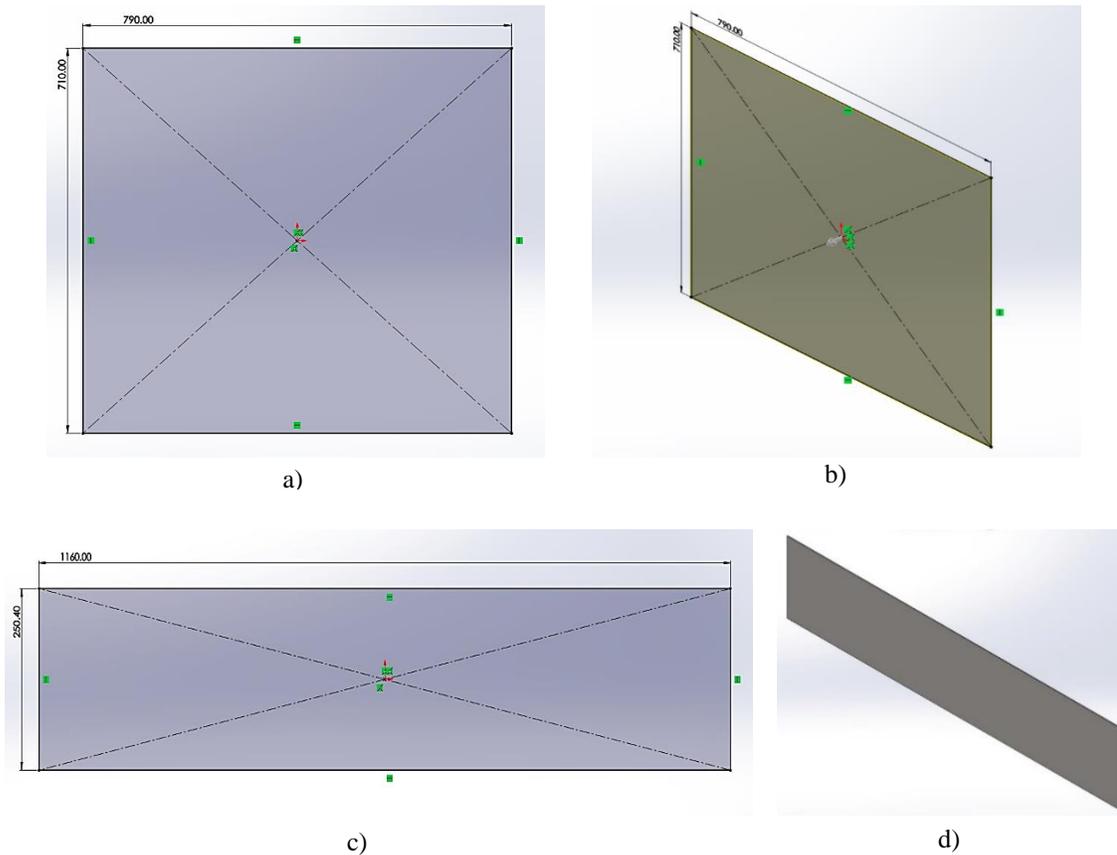


Figura 3.18. Recubrimientos de la estructura inferior: a) Croquizado del recubrimiento lateral, b) Extrucción saliente de 2mm del recubrimiento lateral, c) Croquizado del recubrimiento frontal, d) Extrucción saliente 2mm del recubrimiento frontal. Fuente: Elaboración propia (2022).

Una vez creados los soportes y láminas de manera individual, se prosigió a unir estas piezas al ensamble del diseño dos de la estructura inferior.

Primero se añadieron al ensamble cuatro piezas del soporte antes creado y se establecieron las relaciones de posición correspondientes para situar los elementos de acuerdo a la posición destinada para el cernidor (Figura 3.19).

Finalmente, se incorporaron los recubrimientos al ensamble. Para ello se utilizaron relaciones de posición de tipo coincidente a fin de que las láminas concordaran con los límites del diseño de la estructura inferior. La Figura 3.20 muestra el diseño final del ensamble de la estructura que soportará al cernidor.

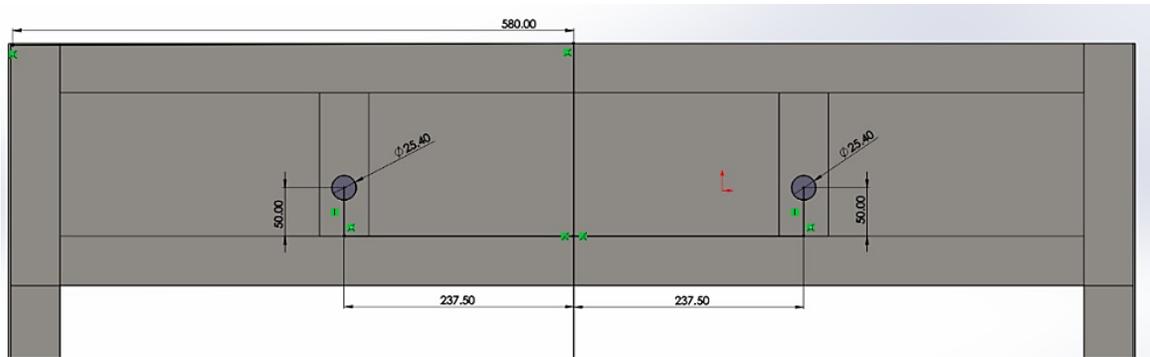


Figura 3.19. Incorporación de los soportes al ensamble de la estructura inferior y sus relaciones de posición.
Fuente: Elaboración propia (2022).

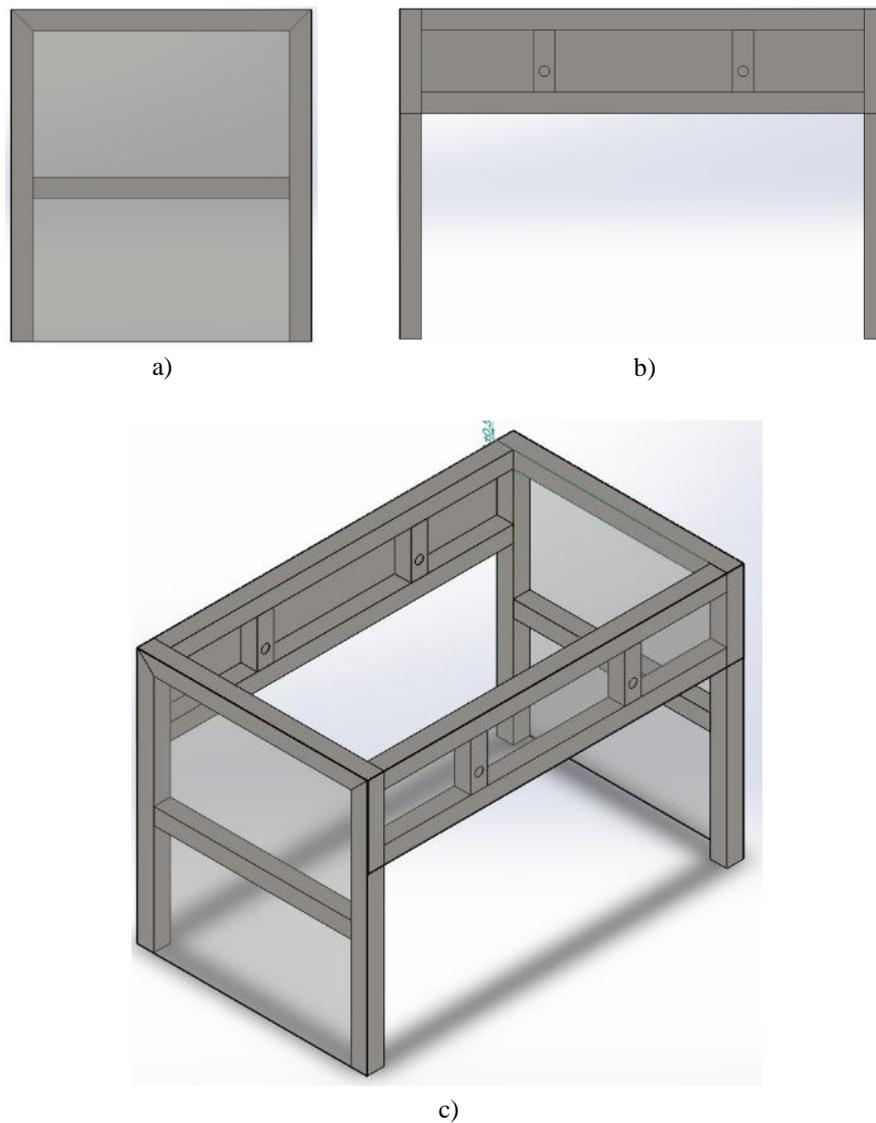


Figura 3.20. Diseño final de la estructura inferior: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **ESTRUCTURA SUPERIOR**

Para el diseño final de la estructura superior se realizó el reemplazo de algunas piezas de PTR de la estructura, de tal manera que la colocación y extracción de la caja desterronadora (una vez implementada en físico) resulte más práctica. De esta manera, se diseñaron tres piezas nuevas basadas en las medidas del PTR variando únicamente su longitud y cortes.

La primera pieza es una adaptación al soporte de las chumaceras que contendrán al eje de la desterronadora. Este elemento cuenta con un corte a 45° y una perforación circular con un diámetro de 10 mm (Figura 3.21), cuya longitud es 280 mm.



Figura 3.21. Diseño del soporte central con orificio para chumacera y corte a 45° para su conexión a la estructura superior. Fuente: Elaboración propia (2022).

La segunda pieza se encarga de unir el soporte central con la estructura superior; está también cuenta con un corte a 45° y tiene una longitud de 290.5 mm (Figura 3.21-a).

Por último, se modificó la estructura PTR que sostenía los orificios superiores de la chumacera para dar espacio al eje soporte central. Esa pieza tiene una longitud de 239.70 mm con dos cortes rectos (Figura 3.21-b).

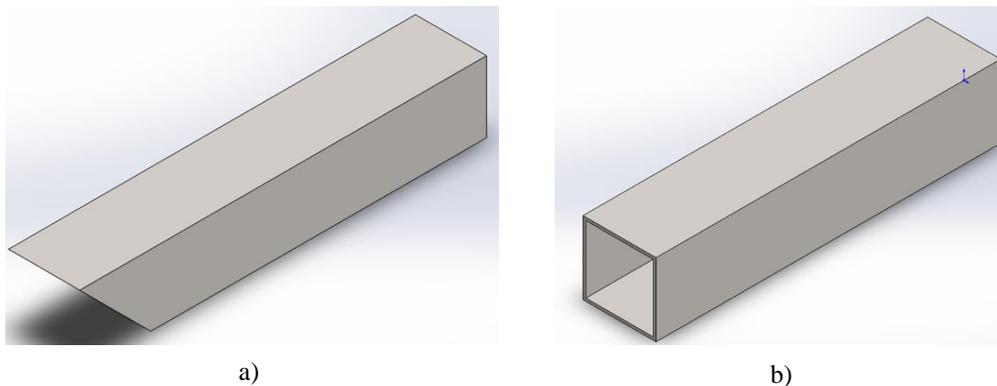


Figura 3.22. Conexiones del eje central a la estructura superior: a) Soporte con corte a 45°, b) Soporte con dos cortes a 90°. Fuente: Elaboración propia (2022).

Antes de realizar el ensamble de los soportes, se prosiguió a diseñar los recubrimientos de la estructura superior a fin de proteger la caja desterronadora, tal y como para la parte inferior de la estructura. Por consiguiente, se diseñaron dos láminas diferentes: una para el perfil lateral (Figura 3.23) y otro para el perfil frontal (Figura 3.24), el cual cuenta con las perforaciones correspondientes para sujetar las chumaceras y extraer y colocar el eje del desterronador.

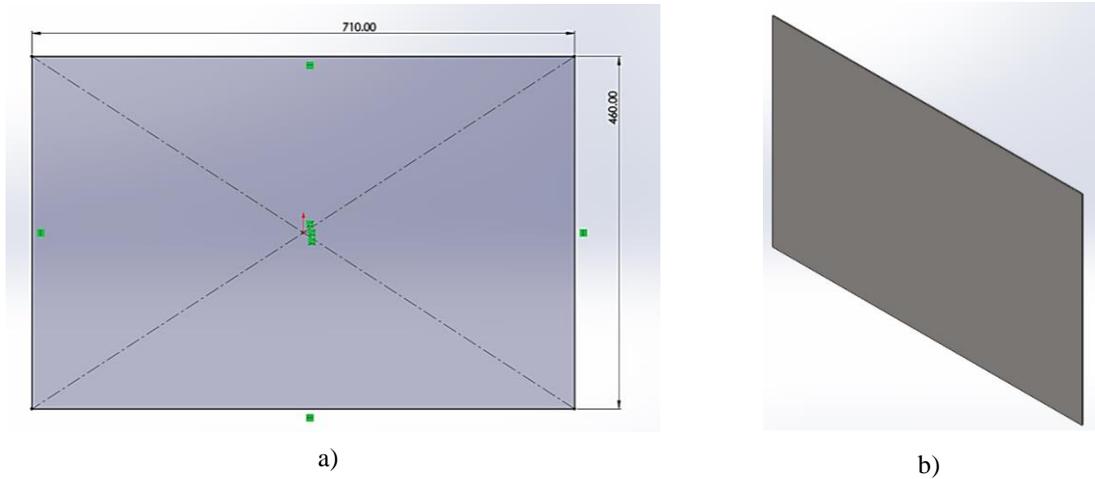


Figura 3.23. Recubrimientos de la estructura superior: a) Croquizado del recubrimiento lateral, b) Extrucción saliente de 2mm del recubrimiento lateral. Fuente: Elaboración propia (2022).

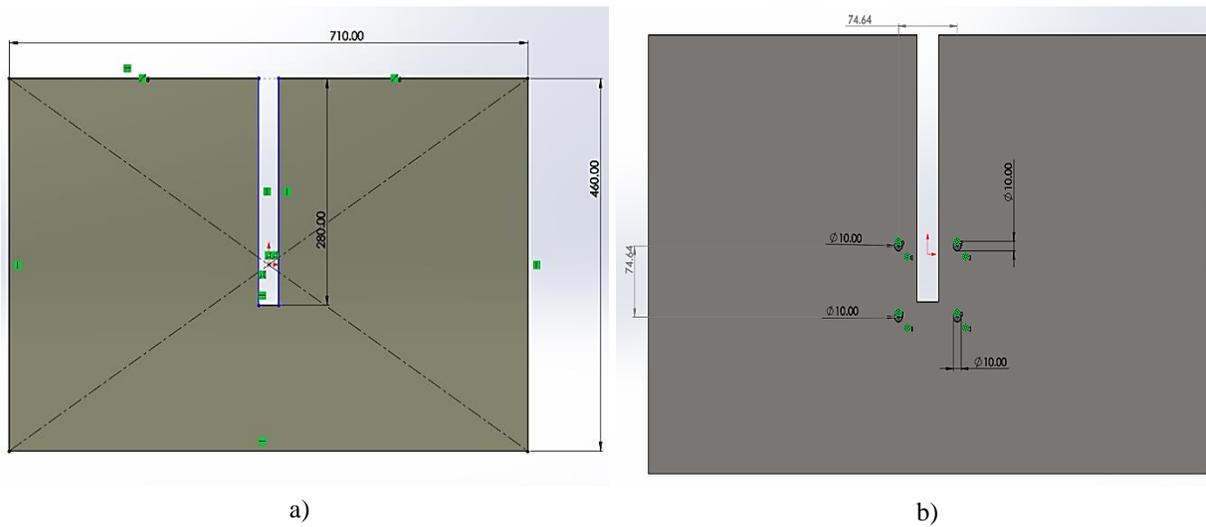


Figura 3.24. Recubrimientos de la estructura superior: a) Croquizado del recubrimiento frontal, b) Extrucción saliente de 2mm del recubrimiento frontal. Fuente: Elaboración propia (2022).

Una vez creados los soportes y láminas de manera individual, se prosiguió a unir estas piezas al ensamble del diseño dos de la estructura superior.

Primero se añadieron al ensamble cuatro piezas de cada uno de los soportes diseñados anteriormente y se establecieron las relaciones de posición correspondientes para situar los elementos de acuerdo a la posición destinada para, posteriormente, ensamblar la caja desterronadora (Figura 3.25).

Finalmente, se incorporaron los recubrimientos al ensamble. Para ello se utilizaron relaciones de posición de tipo coincidente a fin de que las láminas concordaran con los límites del diseño de la estructura superior. La Figura 3.26 muestra el diseño final del ensamble de esta estructura.

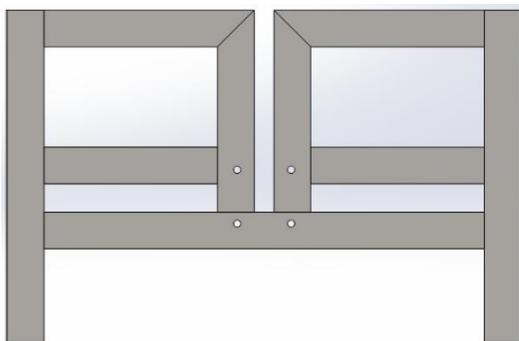
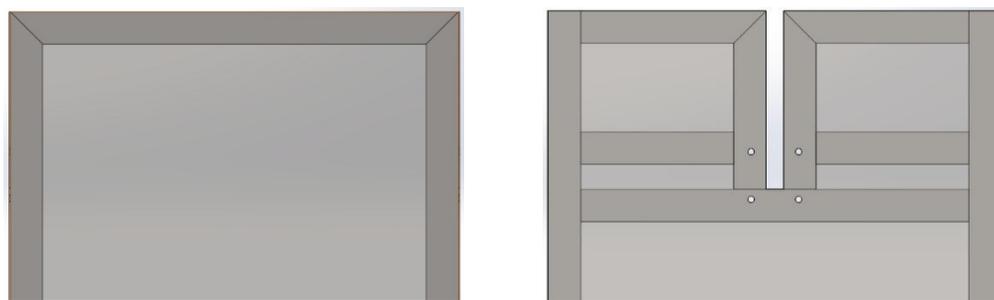
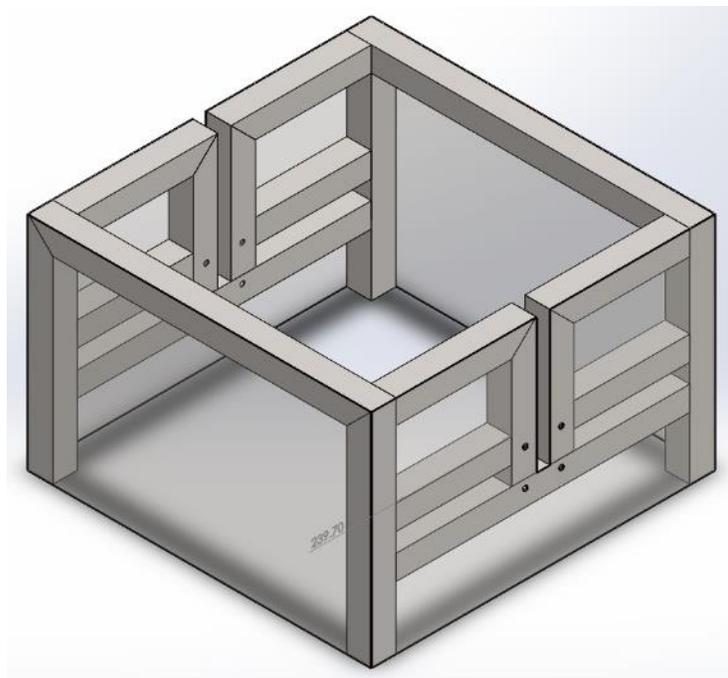


Figura 3.25. Ubicación y conexión de los soportes creados para la estructura superior. Fuente: Elaboración propia (2022).



a)

b)



c)

Figura 3.26. Diseño final de la estructura superior: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **ENSAMBLE DE LA ESTRUCTURA COMPLETA**

Por último, los diseños finales de ambas estructuras (superior e inferior) se unieron en un solo archivo para formar un tercer ensamble de la estructura. Para ello, se siguieron los pasos expuestos anteriormente para el segundo diseño de la estructura inferior; la única diferencia es que, en lugar de realizar un ensamble de piezas, se realizó un ensamble de ensambles entre la estructura inferior y superior (Figura 3.27). Las relaciones de posición que se utilizaron en este ensamble fueron de tipo *coincidente* y de *distancia* para centrar la estructura superior con la estructura inferior, esta última permanecerá como elemento fijo dentro del ensamble.

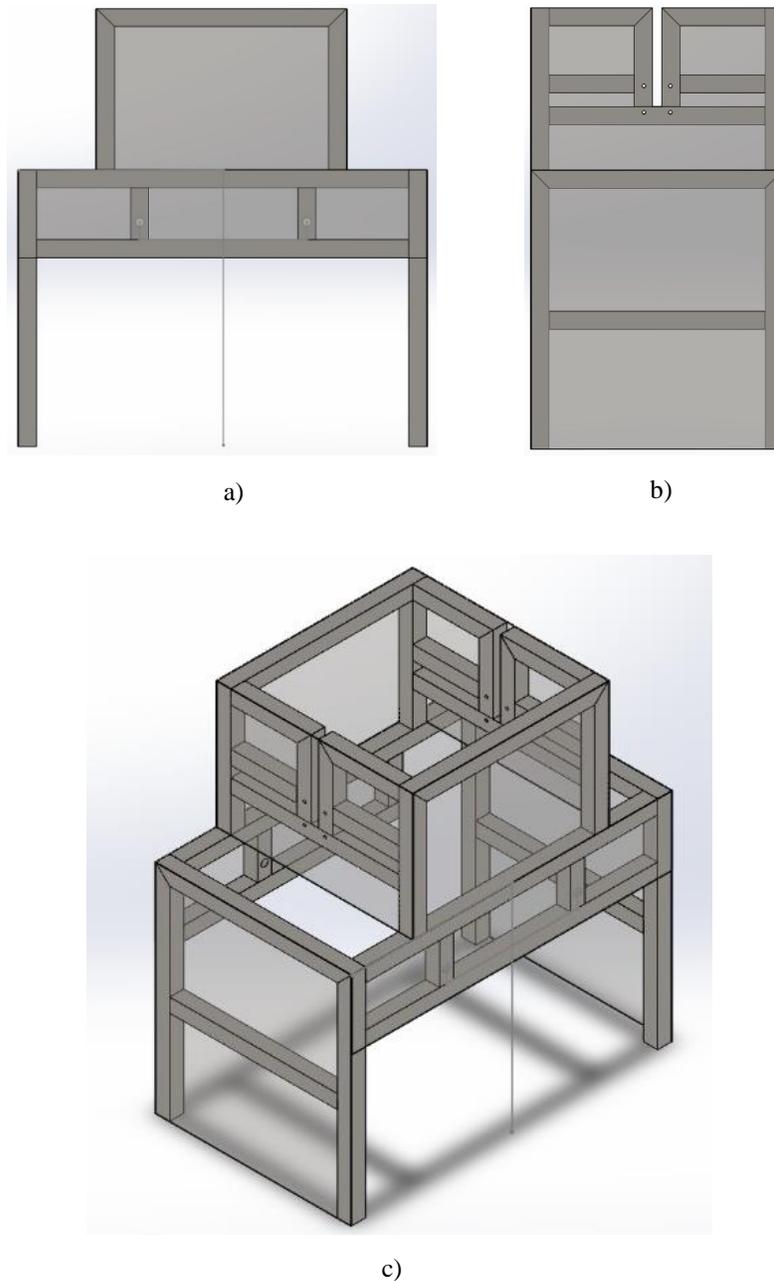


Figura 3.27. Ensamble de la estructura de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla: a) Vista frontal, b) Vista lateral, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2 Diseño de la caja desterronadora

3.2.1 Aspas

- **PRIMER DISEÑO**

El primer diseño de las aspas del desterronador se basa en el primer diseño de la estructura superior de la máquina. La idea era que el diseño del aspa tendría que cumplir la función de una cuchilla para poder triturar la arcilla al rotar sobre un eje a una determinada velocidad, por lo tanto, se optó por diseñar el aspa de forma ovalada con un tipo mazo en los extremos alargados. Tal y como se muestra en el croquis de la Figura 3.28a, el aspa está diseñada con figuras geométricas básicas que incluyen, rectángulos, cuadrados, líneas y circunferencias de una determinada medida. El aspa tiene una longitud de 290 mm x 152 mm de ancho x 2.695 mm de espesor y un corte central cuadrado que atraviesa toda la pieza de 26.4 mm x 26.4 mm, por donde se colocaría un eje cuadrado de 1 in. La Figura 3.28b muestra al primer diseño del aspa impresa en 3D.

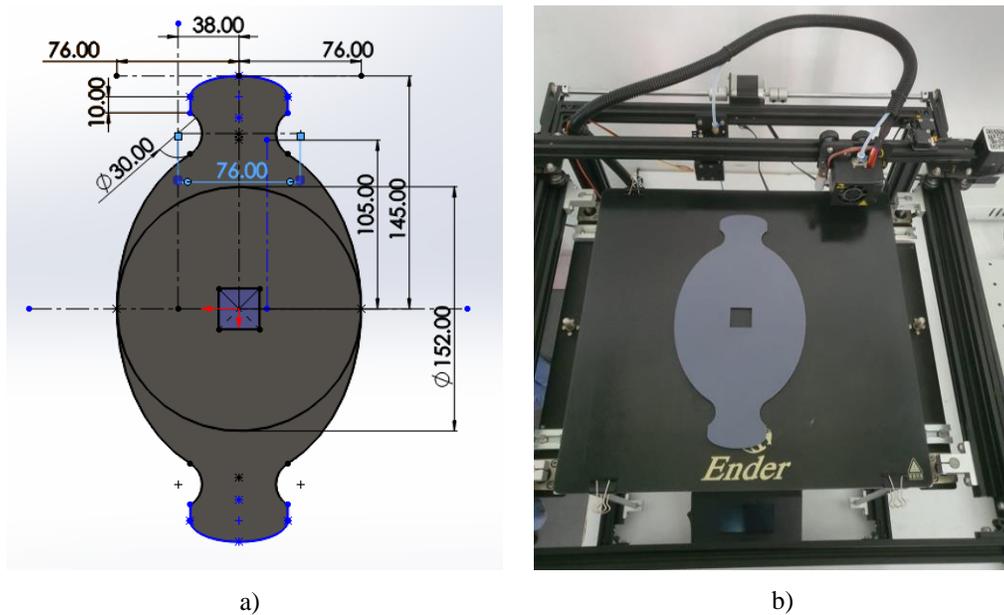


Figura 3.28. Croquis del primer diseño del aspa: a) Primer diseño del aspa en SolidWorks, b) Primer diseño del aspa impreso en 3D. Fuente: Elaboración propia (2022).

Debido a que el primer diseño de la estructura se modificó, las aspas basadas en él también se tuvieron que modificar por unas de mayor tamaño para que concordaran con las especificaciones de la estructura modificada.

- **SEGUNDO DISEÑO**

Para el segundo diseño del aspa se creó un nuevo documento de tipo pieza y dentro del croquis se realizó un boceto similar al del primer diseño, variando algunas medidas de las cuchillas y el largo del aspa, tal como se muestra en la Figura 3.29a. El grosor del aspa y el tamaño del corte cuadrado en el centro permaneció igual al primer diseño.

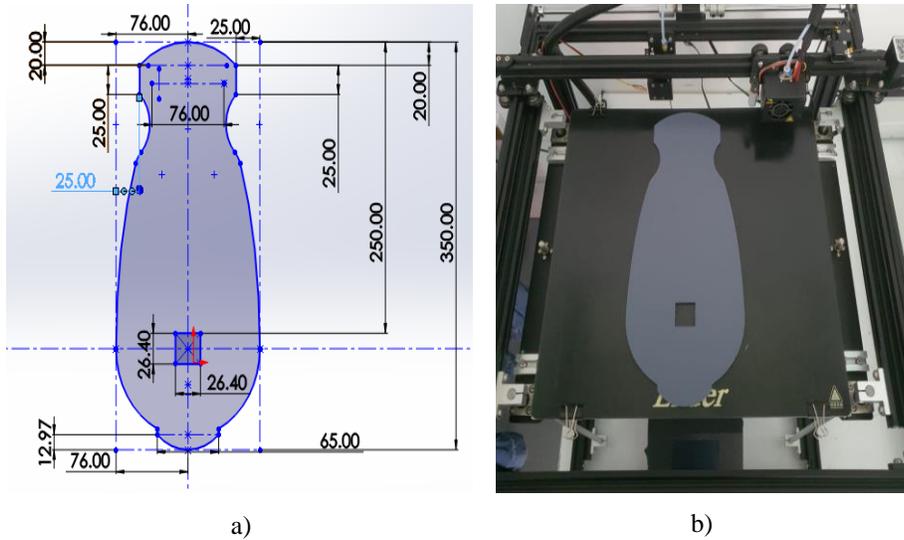


Figura 3.29. Segundo diseño del aspa: a) Segundo diseño del aspa en SolidWorks, b) Segundo diseño del aspa impreso en 3D. Fuente: Elaboración propia (2022).

El inconveniente de esta aspa es que, por las medidas, esta llegaba hasta la parte inferior de la estructura donde se montaría el cernidor, lo que causaría problemas al final en el funcionamiento de la máquina. La Figura 3.29b muestra al primer diseño del aspa impreso en 3D.

• **TERCER DISEÑO**

Para el tercer diseño del aspa se optó por suprimir uno de los mazos y disminuir el largo de la pieza. Las especificaciones de las medidas se muestran en la Figura 3.30.

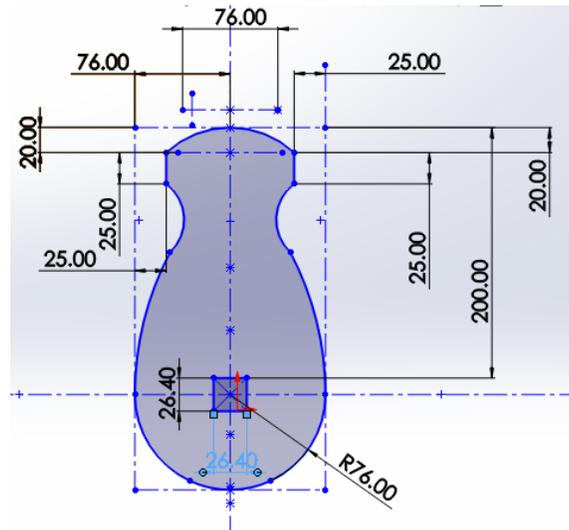
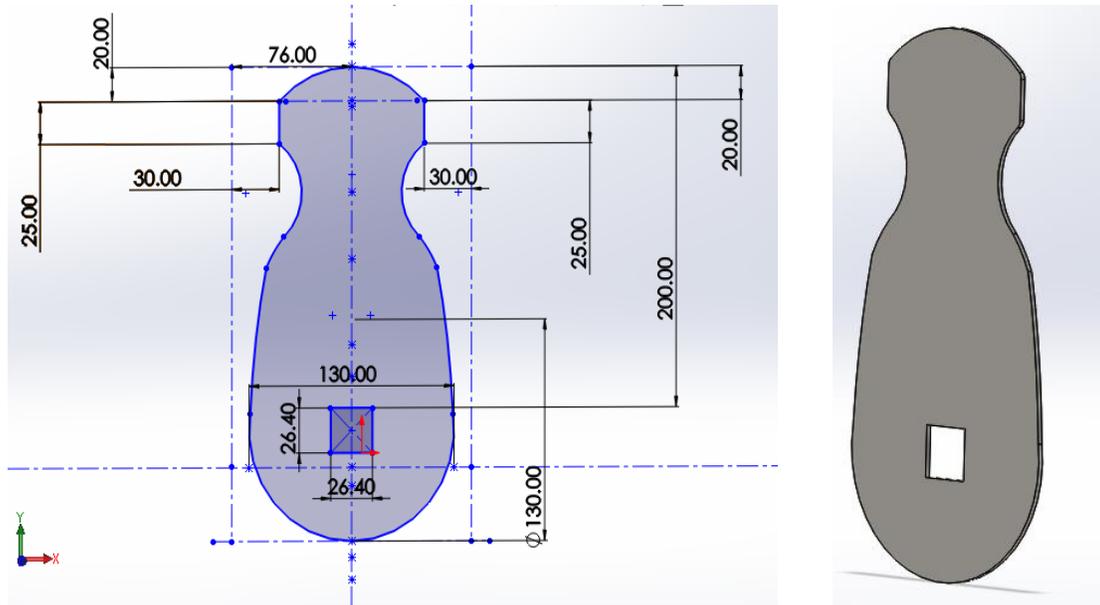


Figura 3.30. Tercer diseño del aspa. Fuente: Elaboración propia (2022).

El tercer diseño ya cumplía los requerimientos de largo y ancho, sin embargo, la parte del mazo no estaba bien definida por lo que se desconocía si realmente iba a resultar de utilidad para cortar el material.

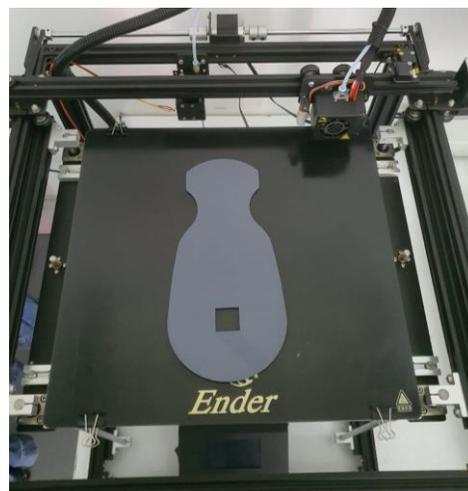
• DISEÑO FINAL

A fin de solucionar los problemas de los diseños anteriores, se disminuyó el ancho del aspa y se incrementó su longitud. Además, se modificó la forma del mazo para que el proceso de trituración se realizará de manera más eficiente. Las dimensiones del diseño final del aspa se muestran en la Figura 3.31a. Como se observa, el tamaño del corte cuadrado en el centro y otros parámetros permanecieron igual a los diseños anteriores; así como el espesor de la pieza apreciado en la Figura 3.31b. Si bien los cambios realizados entre ciertos diseños no fueron muy notorios, si fueron decisivos para llegar al diseño final. La Figura 3.31c muestra al aspa física impresa en 3D.



a)

b)



c)

Figura 3.31. Diseño final del aspa: a) Croquis en 2D, b) Modelado 3D en SolidWorks, c) Impresión 3D. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2.2 Discos

- **PRIMER DISEÑO**

Los discos son el elemento que, junto con las aspas, irían dispuestos en un eje para realizar en conjunto el proceso de desterronamiento de la arcilla.

El primer diseño del disco obedeció al diámetro del primer diseño del aspa. En la Figura 3.32 se muestran las dimensiones de la pieza; como se observa el disco consisten en una circunferencia de 152 mm de diámetro, un espesor de 2.695 mm y un corte cuadrado al centro de 26.40 mm x 26.40 mm.

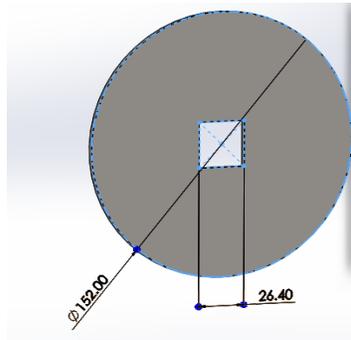


Figura 3.32. Primer diseño del disco en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **DISEÑO FINAL**

El diseño final del disco se obtuvo con el diseño final del aspa debido a que estos dos elementos debían de ser coincidentes para poder llevar a cabo la función de trituración. Por lo tanto, simplemente se modificó el diámetro del disco a 130 mm (Figura 3.33a), quedando así el tamaño del cuadrado y el espesor iguales al primer diseño. La Figura 3.33b muestra este elemento impreso en 3D.

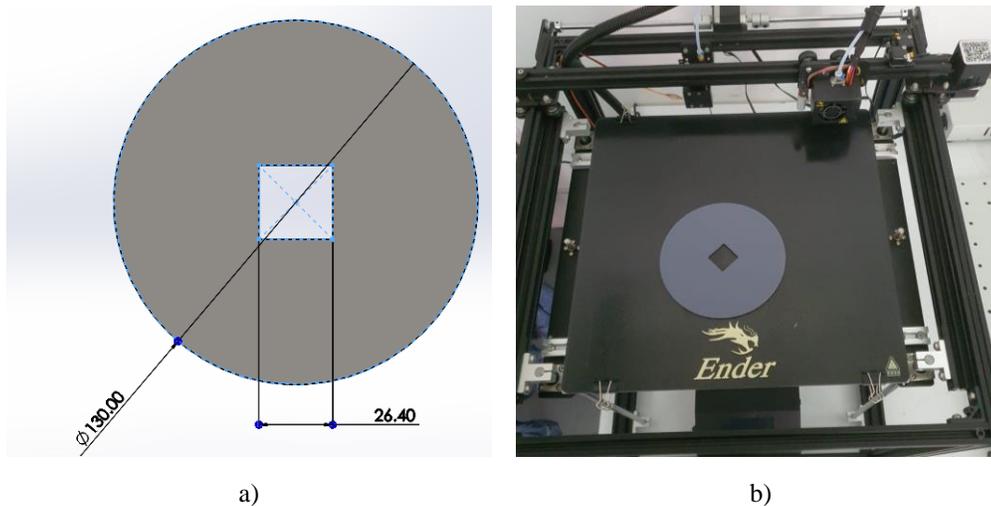


Figura 3.33. Diseño Final del disco: a) Dimensiones del disco, b) Impresión del disco en 3D. Fuente: Elaboración propia (2022).

Es importante destacar que el tamaño del cuadrado perforado, tanto en los discos como en las aspas, corresponde a las dimensiones previstas del eje más 1 mm de tolerancia.

3.2.3 Eje

- **PRIMER DISEÑO**

Para el primer diseño del eje se contempló de primera cuenta el material que se tenía previsto utilizar en la implementación física del proyecto. Por lo tanto, se diseñó un eje cuadrado sólido de 1 in (25.4 mm x 25.4 mm) con una longitud de 710 mm (Figura 3.34), misma que correspondía a la longitud de la estructura superior en el primer diseño.



Figura 3.34. Primer diseño del eje. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **DISEÑO FINAL**

Para el diseño final del eje se agregaron dos redondeos de 25.4 mm de diámetro a ambos extremos del eje con una extrucción de 98 mm y 298 mm, respectivamente, con el fin de que este pudiera ser montado en la caja del motor y el rodamiento de las chumaceras de pared. Además, la parte cuadrada se redujo a 598.61 mm, medida que corresponde a la longitud interna del diseño final de la estructura superior.

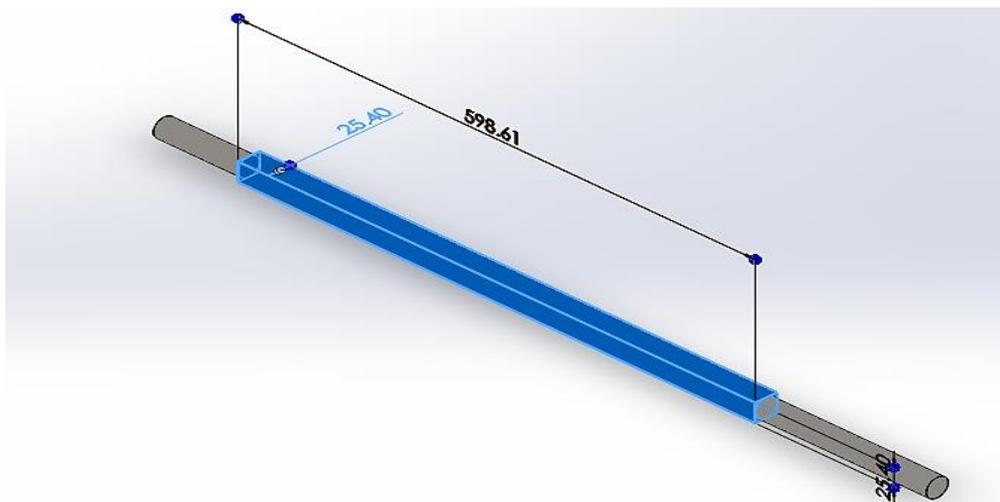


Figura 3.35. Diseño final del eje. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2.4 Caja

- **PRIMER DISEÑO**

El primer diseño de la caja está basado en el primer diseño de la estructura superior. Para esta pieza se utilizaron figuras geométricas básicas como cuadrados y circunferencias, así como operaciones básicas de modelado como fue la extrucción de base y de corte.

Se comenzó creando un nuevo croquis de trabajo para insertar dos cuadrados con el mismo origen de 650 mm y 500 mm de cada lado (Figura 3.36a). A este boceto en 2D se le aplicó una extrucción de 350 mm para realizar el modelado 3D. Posteriormente, sobre vista inferior de la pieza, se creó un nuevo croquis en donde se dibujó un cuadro de 505 mm de lado (Figura 3.36b) y una extrucción de corte de 345 mm. Finalmente, se realizaron los orificios en las caras laterales de 505 mm, por donde se colocaría el eje diseñado; estos orificios tenían un diámetro de 50.8 mm (Figura 3.36c). La vista isométrica se muestra en la Figura 3.37.

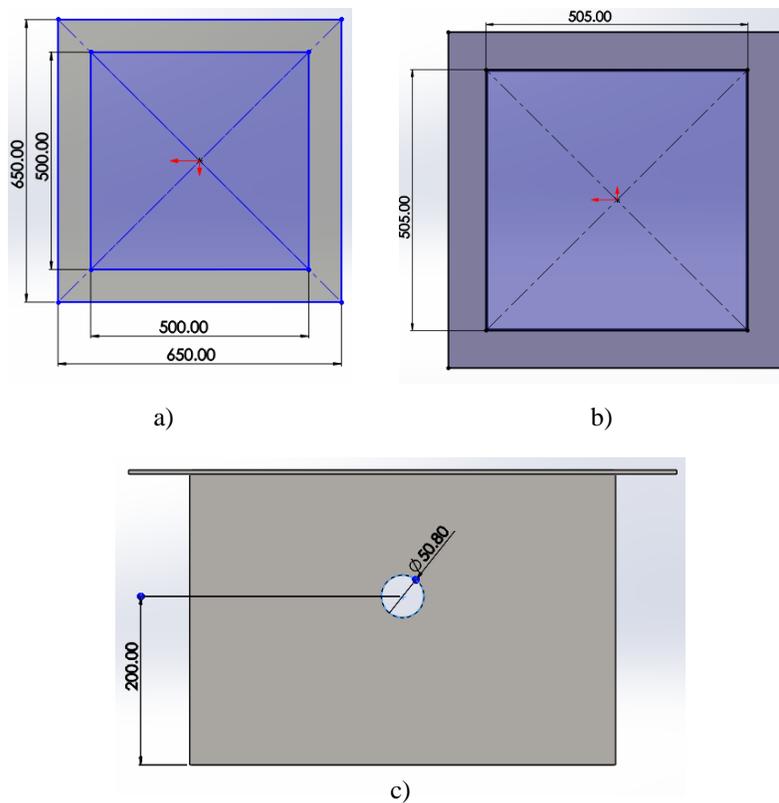


Figura 3.36. Primer diseño de la caja desterronadora: a) Croquisado 1, b) Croquisado 2, c) Extrucción de corte. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **SEGUNDO DISEÑO**

El segundo diseño de la caja de la desterronadora se basó en las dimensiones finales del diseño final de la estructura superior de la máquina. Al igual que para los otros elementos, se utilizó como material acero al carbón no aleado en forma de lámina de 2.7 mm de espesor. La Figura 3.38a muestra las dimensiones de las paredes de la caja. Además, al igual que para el diseño

uno, se realizaron dos cortes centrales en los laterales: uno cuadrado y otro circular, ambos con una dimensión de 26.4 mm (Figura 3.38b). La vista isométrica del modelo 3D se muestra en la Figura 3.38c.

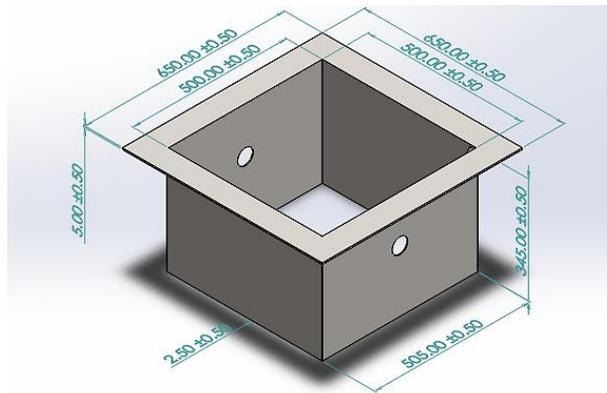


Figura 3.37. Vista isométrica del primer diseño de la caja desterradora. Fuente: Elaboración propia (2022).

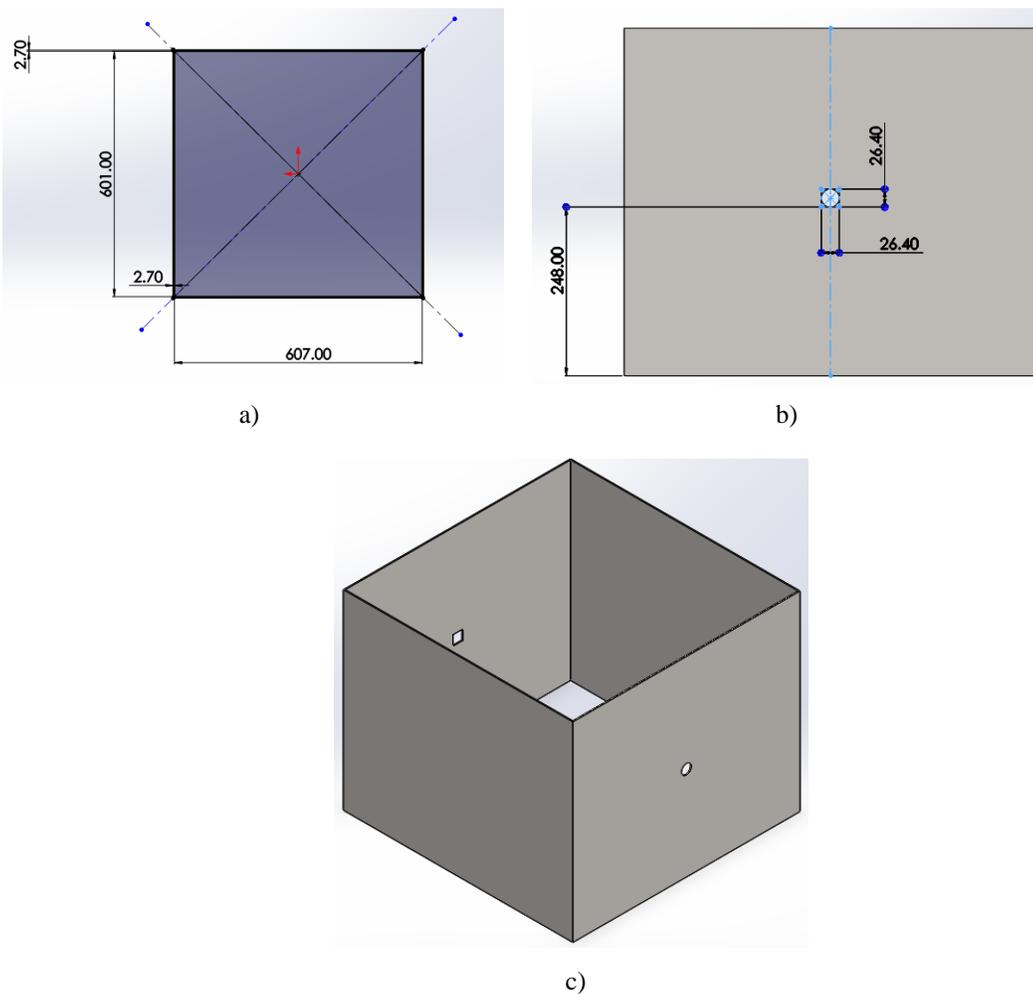


Figura 3.38. Segundo diseño de la caja desterradora: a) Croquizado, b) Extrucción de corte, c) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

- **DISEÑO FINAL**

Para el diseño final simplemente se agregaron unas pestañas superiores de 2.695 mm de espesor (parecidas al primer diseño) para montar la caja sobre la estructura. Estas pestañas fueron croquizadas sobre la vista superior del segundo diseño de la caja desterronadora; las especificaciones de este diseño y su vista isométrica se muestran en la Figura 3.39.

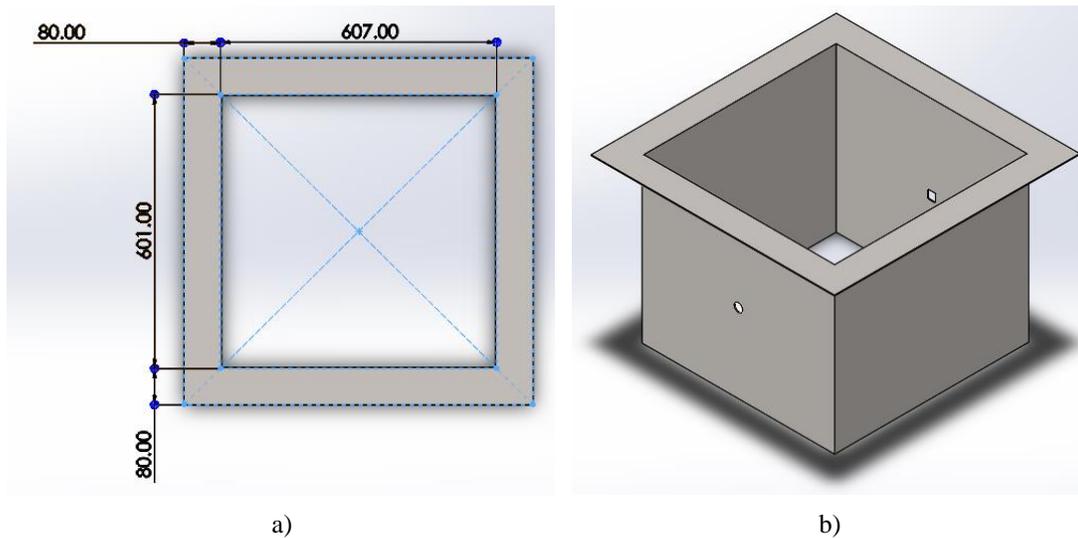


Figura 3.39. Diseño final de la caja de la desterronadora: a) Croquizado, b) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2.5 Lámina

- **PRIMER DISEÑO**

Para el primer diseño de la lámina se utilizó el mismo archivo creado para el primer diseño de la caja de la desterronadora. Se realizó el croquizado sobre una de las caras laterales con perforación tal y como se muestra en la Figura 3.40a; a este croquis se le realizó una extrucción de 10 mm y, posteriormente, se aplicó una matriz lineal para repetir el diseño a lo largo de toda la estructura con una separación de 20mm entre ellos (Figura 3.40b). La vista isométrica de este diseño se muestra en la Figura 3.40c.

- **DISEÑO FINAL**

Debido a que el diseño anterior implicaba un aumento de peso considerable a la estructura y por lo tanto un aumento en el costo de fabricación, se optó por cambiar el primer diseño por una lámina rectangular a la cual se le aplicaría, posteriormente en la implementación física, un dobles y varias perforaciones para permitir que el material caiga al cernidor una vez desterronado.

Cabe destacar que en el software no se realizaron las perforaciones correspondientes a la lámina debido a limitaciones de hardware y software de la PC utilizada.

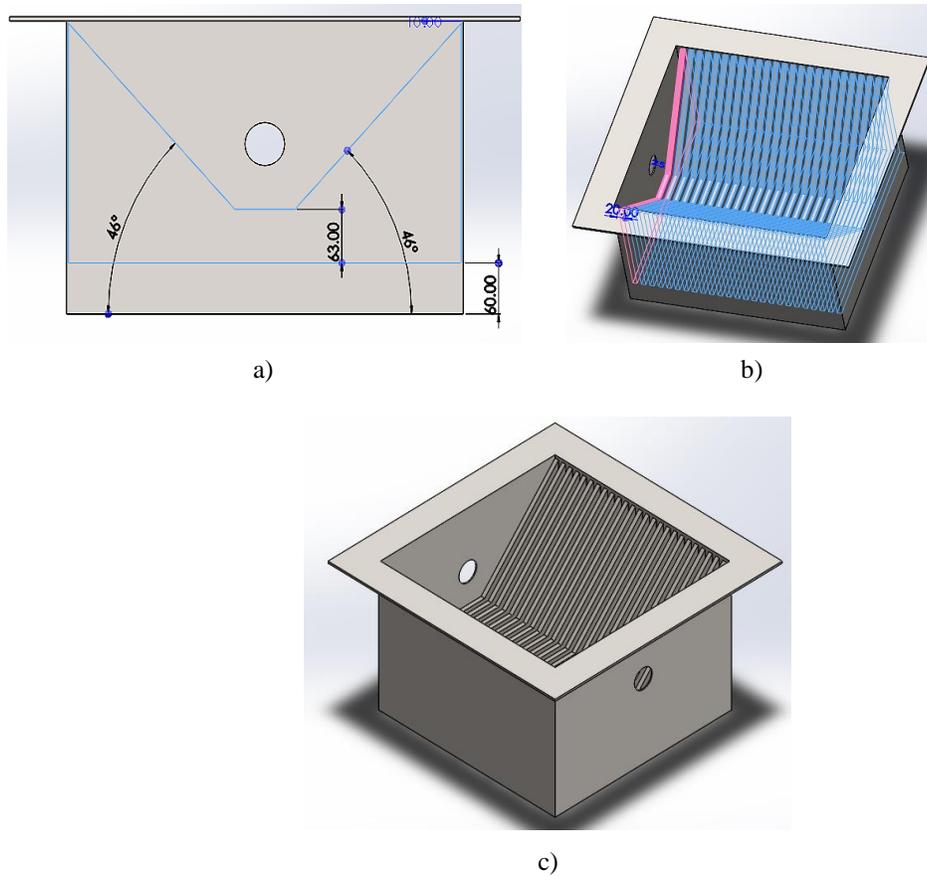


Figura 3.40. Primer diseño de la lámina: a) Croquisado, b) Matriz lineal, c) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

Las especificaciones del diseño de la lámina se muestran en la Figura 3.41. Cabe destacar que para determinar la longitud de la lámina se tuvieron que considerar los diseños finales de los elementos anteriores como fueron la estructura superior, la caja desterronadora y las aspas; además, se le realizó una extrucción de 601.61 mm equivalente al ancho de la caja desterronadora.

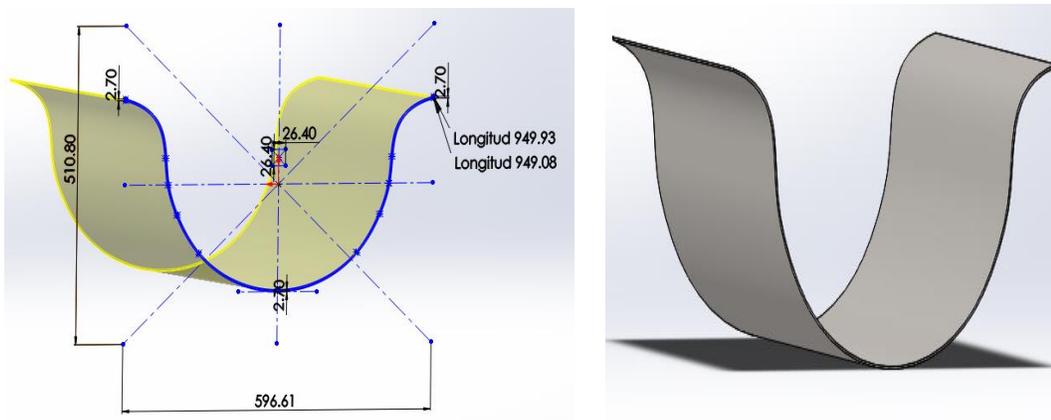


Figura 3.41. Diseño final de la lámina. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.2.6 Ensamble aspas-discos y eje

Debido a la complejidad de este ensamble por la cantidad de piezas y relaciones de posición a utilizar, se optó por realizarlo por partes y en diferentes archivos de tipo ensamblaje para al final, realizar un ensamble de ensambles.

El primer ensamble consistió en realizar la unión de un aspa con dos discos (Figura 3.42a) para posteriormente, crear un nuevo archivo e insertar dentro de este dos veces el ensamble antes creado. En la Figura 3.42b se muestra la disposición entre estos dos ensambles formando una L; las relaciones de posición, para cualquiera de los casos, son de tipo coincidente entre caras de discos-aspas y entre aristas de los cortes centrales de ambos ensambles.

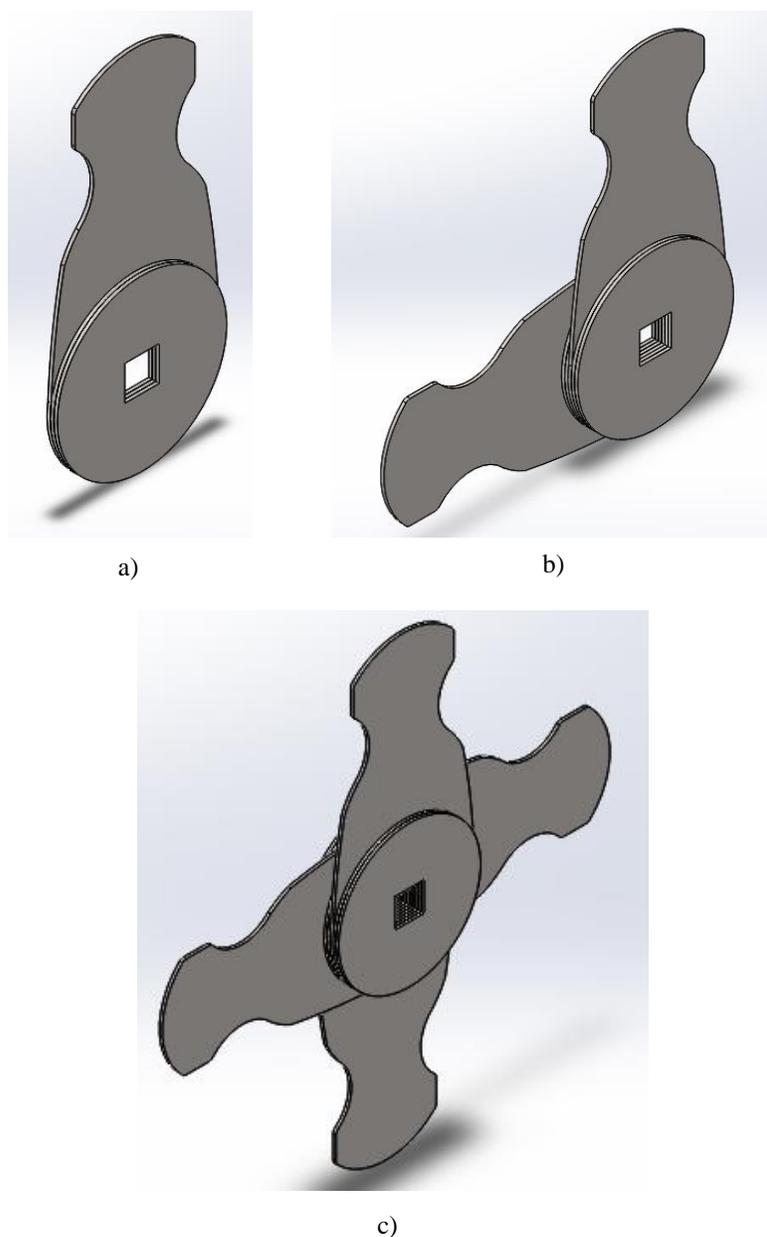


Figura 3.42. Ensamblajes aspas-discos: a) Ensamble sencillo, b) Ensamble doble, c) Ensamble en cruz. Fuente: Elaboración propia (2022).

Para el tercer ensamble se necesitó insertar dos veces el ensamble de la Figura 3.42b y disponerlos con ayuda de las relaciones de posición en forma de cruz (Figura 3.42c). Este ensamble es que se utilizará repetidas veces para formar el ensamble de ensambles final hasta completar todo el eje.

El ensamble de ensambles final cuenta con un total de 18 ensambles de cruz más dos discos individuales agregados a un extremo para cerrar el patrón. En este ensamble, el eje es el elemento fijo y los ensambles de cruz se van uniendo entre mediante relaciones de posición coincidentes.

La Figura 3.43 muestra la vista isométrica del ensamble final de las aspas-discos y el eje.

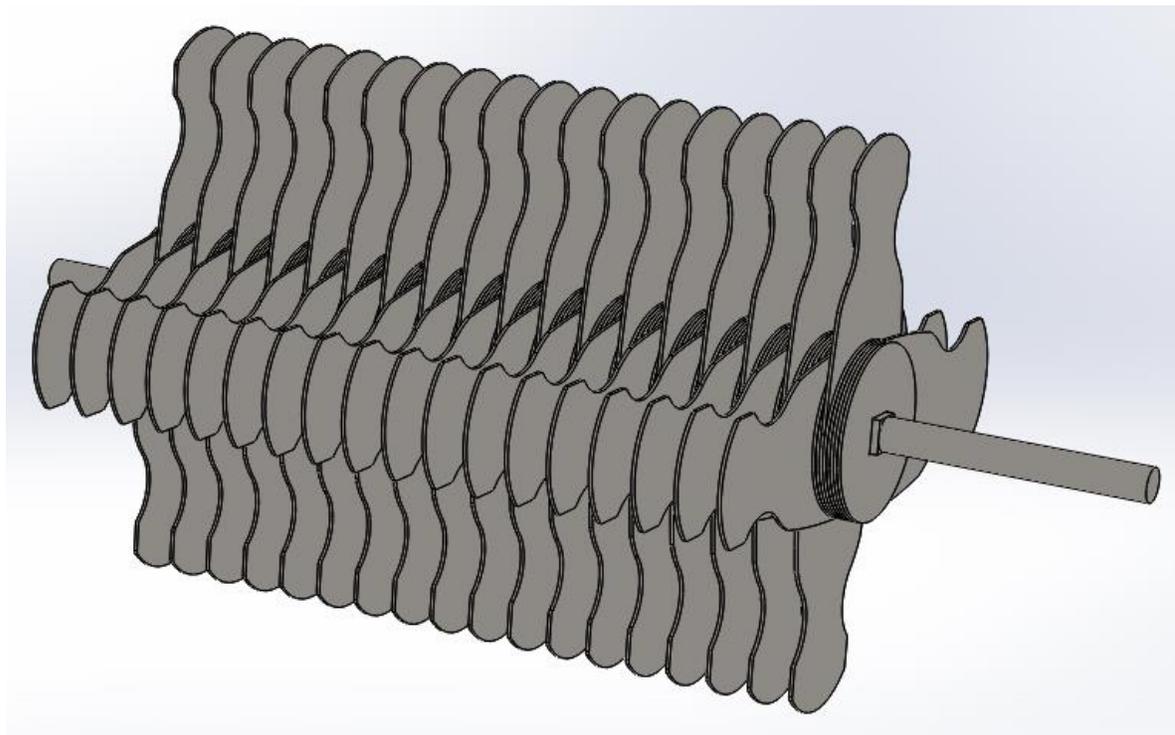
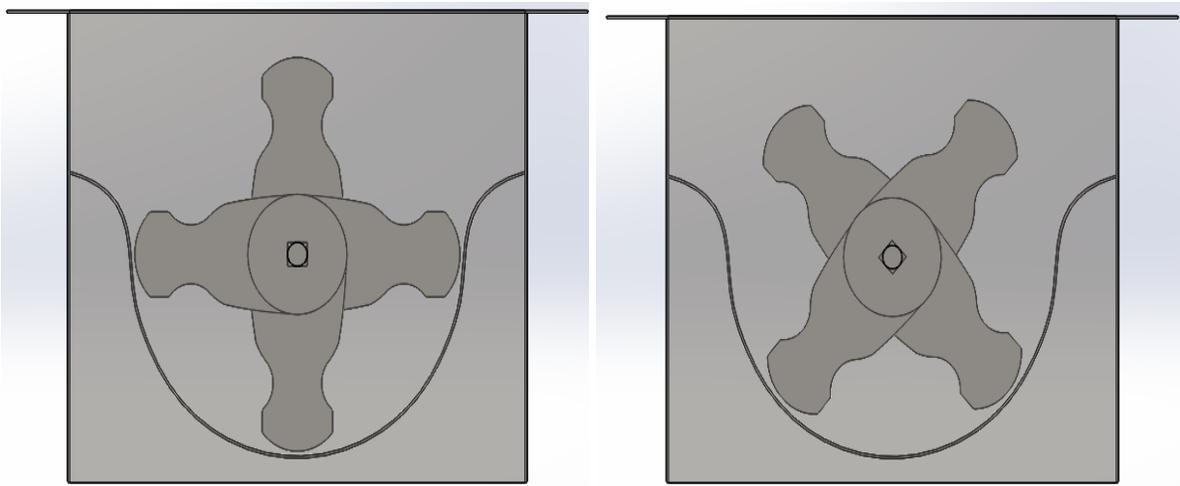


Figura 3.43. Vista isométrica del ensamble final de las aspas-discos y eje. Fuente: Elaboración propia (2022).

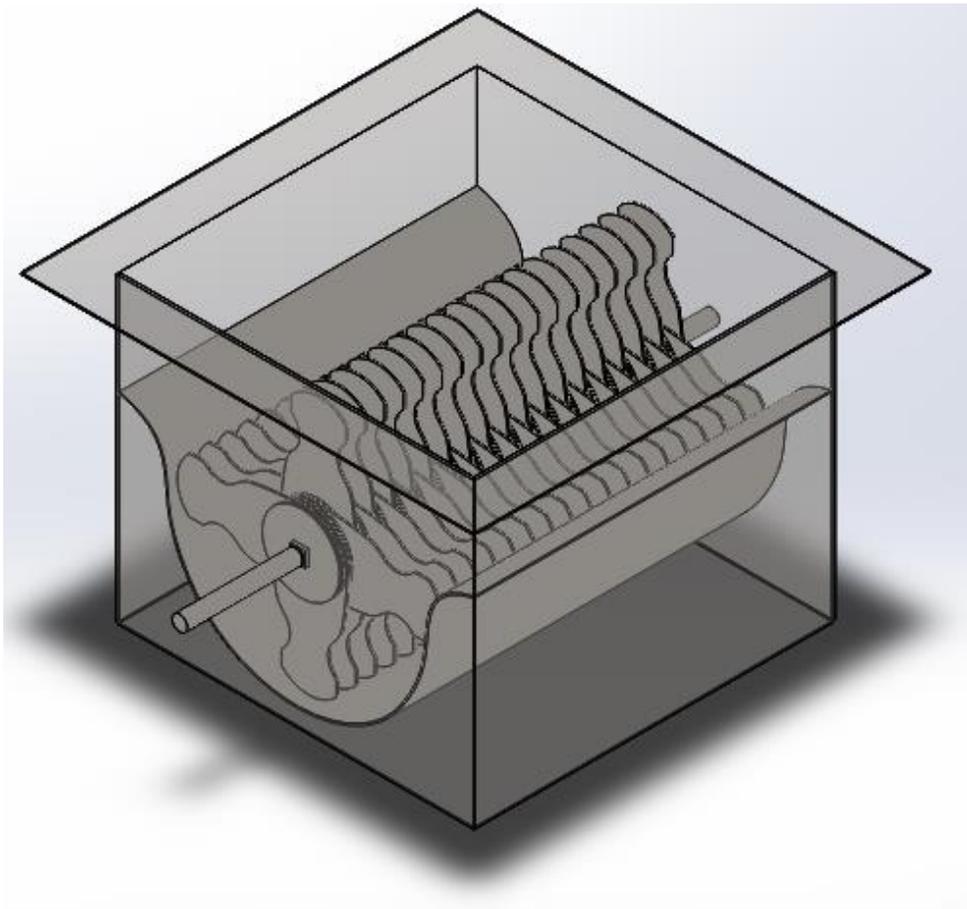
3.2.7 Ensamble caja-lámina-desterrador

Para el ensamble final de la desterradora, primeramente, se insertó a la caja como elemento fijo dentro del documento; en seguida se agregó a la lámina y las relaciones de posición correspondientes que, para este caso, eran de tipo coincidente y de distancia para que la lámina quedara posicionada a una altura de 174 mm respecto a la parte superior de la caja. Por último, se agregó el ensamble de las aspas-discos-eje para que este último fuera concéntrico a la perforación circular de la caja con una separación de 1.5 mm entre la pared de la caja y la arista del eje cuadrado. La Figura 3.44 muestra el resultado final del ensamble.



a)

b)



c)

Figura 3.44. Ensamble final de la desterronadora: a) Vista lateral , b) Vista lateral con giro en las aspas, c) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.3 Diseño del cernidor

3.3.1 Primer diseño

El primer diseño del cernidor consistía en una caja rectangular de 655 mm x 505 mm (Figura 3.45a) y una extrucción de 250 mm. Posteriormente, sobre la cara superior se croquizó un rectángulo de 650 mm x 500 mm (Figura 3.45b) y se le realizó una extrucción de corte de 250 mm. Por último, se diseñaron cuatro soportes laterales para montar el cernidor sobre la estructura. Estos soportes eran cilindros de 25.4 mm de diámetro y 50.8 mm de espesor (Figura 3.45c).

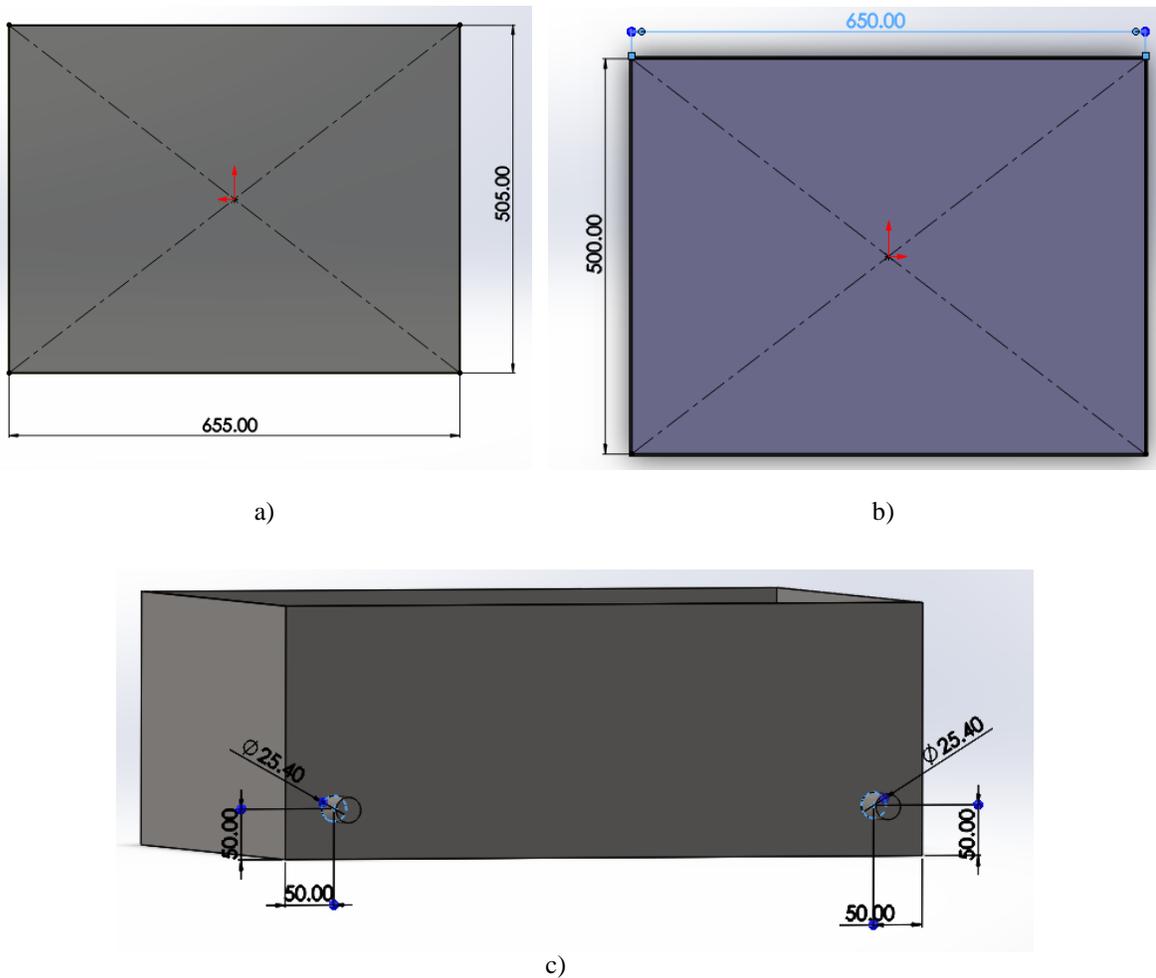


Figura 3.45. Primer diseño del cernidor: a) Croquisado y modelado 3D, b) Extrucción de corte, c) Soportes laterales. Fuente: Elaboración propia (2022).

Para la parte de la malla de cernido, se óptó simplemente por colocar una “lamina” transparente del tamaño interior del cernidor sin ninguna perforación, esto debido a los bajos recursos de la PC con la que se trabaja el software CAD.

La Figura 3.46 muestra la vista isométrica del primer diseño del cernidor.

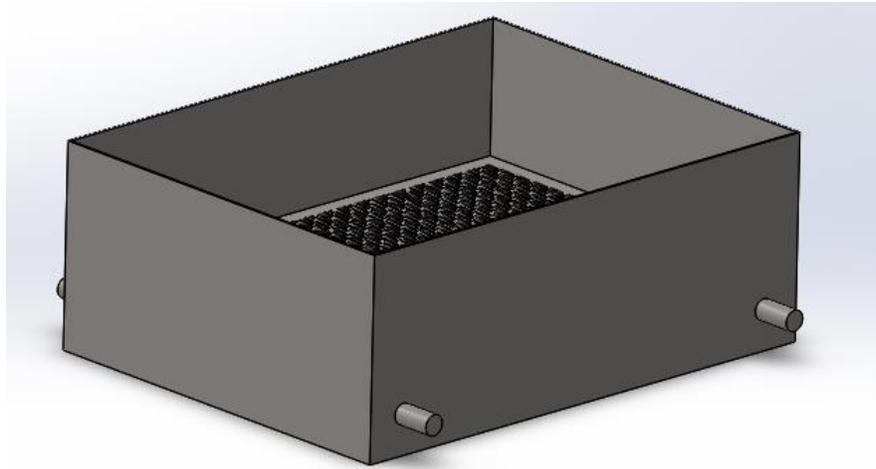


Figura 3.46. Vista isométrica del primer diseño del cernidor. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.3.2 Diseño Final

Para el diseño final se optó por realizar las piezas por separado (igual que para el diseño final de la estructura) y por último realizar un ensamble.

Como primer paso se diseñó un ángulo recto de 2 cm de ancho (Figura 3.47); lo único que variaba respecto a un ángulo de otro era su longitud, siendo el croquis siempre igual en todos ellos.

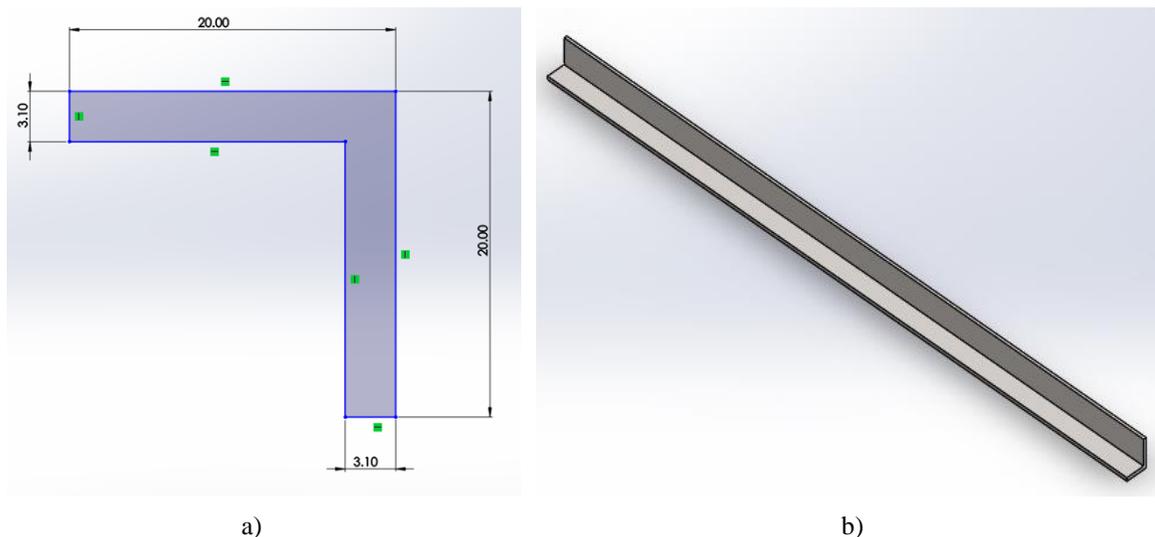


Figura 3.47. Ángulo diseñado para conformar la estructura del cernidor: a) Croquis, b) Extrucción saliente. Fuente: Elaboración propia (2022).

La Tabla 3.5 muestra las especificaciones de los ángulos a utilizar en el ensamble.

Tabla 3.5. Medidas de los componentes del diseño final del cernidor. Fuente: Elaboración propia (2022).

Cantidad	Medidas
4	675 mm
4	520 mm
4	200 mm

Después de los ángulos, se tuvo que crear un elemento que sirviera de conexión entre estas piezas. Para ello se diseñó un elemento llamado “Esquinas” con el mismo croquizado de la Figura 3.47a, pero de 2 cm de longitud y añadiendo una cara lateral extra (Figura 3.48).

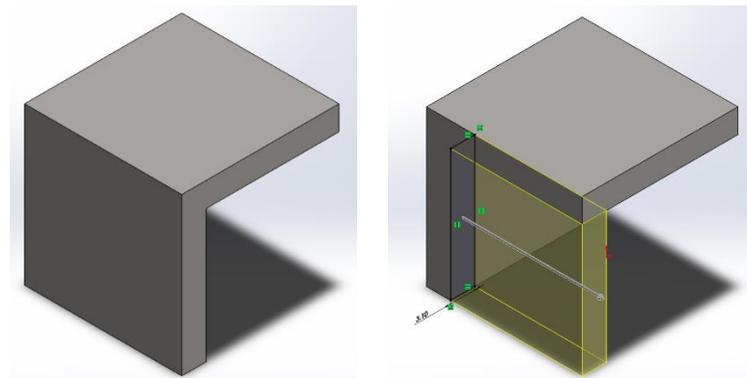


Figura 3.48. Elemento de conexión para los ángulos diseñados. Fuente: Elaboración propia (2022).

Posteriormente, se diseñaron los recubrimientos correspondientes al cernidor; uno de ellos, es una lámina rectangular de 2 mm de espesor y representa al recubrimiento lateral (Figura 3.49). El otro es un rectángulo de 2 mm de espesor con dos perforaciones circulares y representa al recubrimiento frontal (Figura 3.50); en estas caras se ensamblarán los soportes del cernidor.

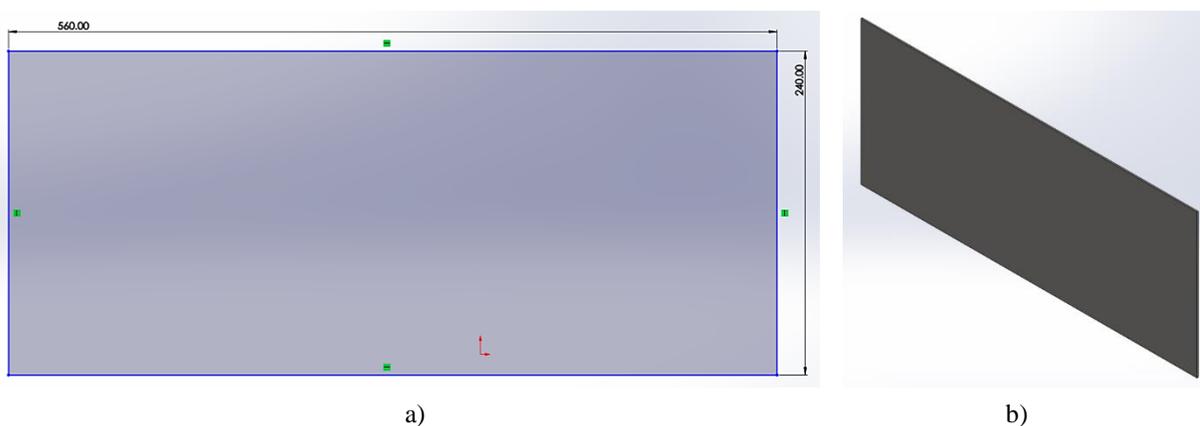


Figura 3.49. Recubrimiento lateral del cernidor: a) Croquis, b) Extrucción saliente. Fuente: Elaboración propia (2022).

De este modo, se diseñó un soporte y rodamiento para servir de conexión entre el cernidor y la parte inferior de la estructura.

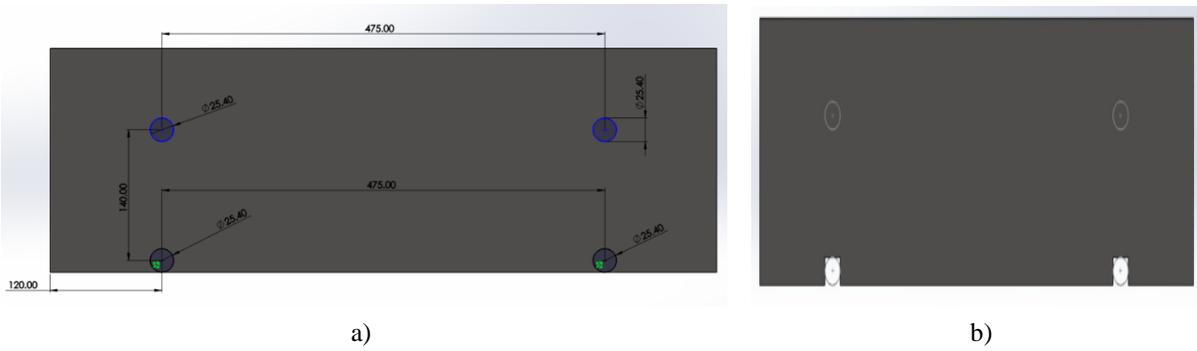


Figura 3.50. Recubrimiento frontal del cernidor: a) Croquis, b) Extrucción de corte. Fuente: Elaboración propia (2022).

El soporte es un cilindro de 25.4 mm de diámetro con una extrucción saliente de 72.875 mm (Figura 3.51)

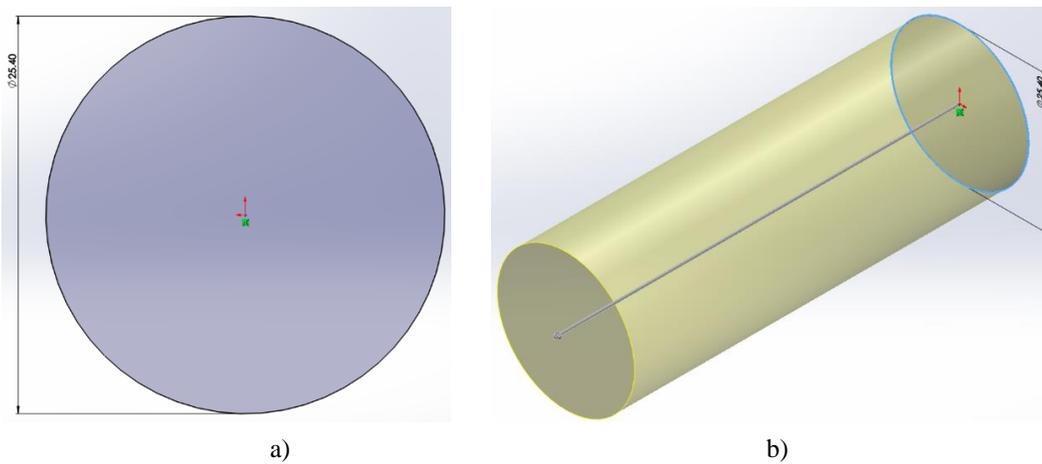


Figura 3.51. Soporte del cernidor: a) Croquis, b) Extrucción saliente. Fuente: Elaboración propia (2022).

El diseño del rodamiento, así como sus dimensiones, se presenta en la Figura 3.52 y tiene una extrucción saliente de 12.50 mm.

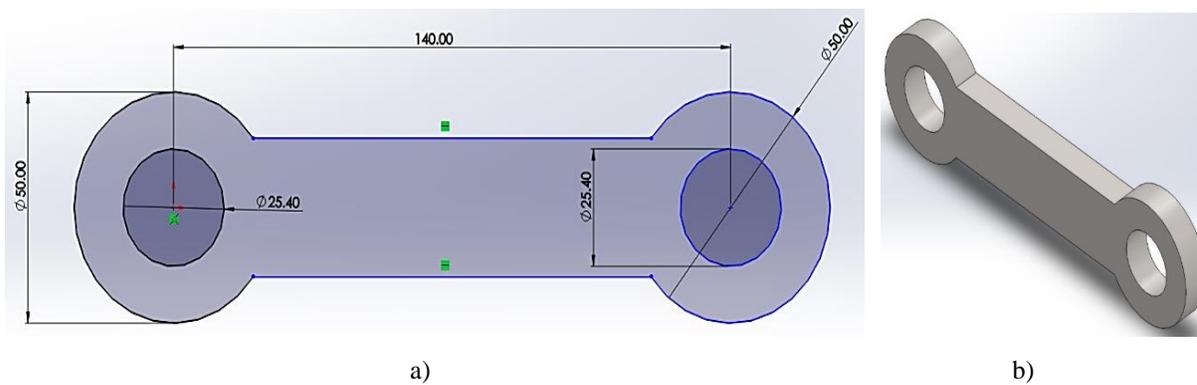


Figura 3.52. Rodamiento del cernidor: a) Croquis, b) Extrucción saliente. Fuente: Elaboración propia (2022).

Cómo último elemento se diseñó la malla cernidora, pero como un elemento sólido de 1.219 mm de espesor y una longitud equivalente al ensamblaje del cernidor; esto para evitar complicaciones en el modelado 3D. Además, en los bordes se hicieron 24 perforaciones (Figura 3.53), mismas que servirán de guía para que en la implementación del proyecto se remache la malla con la estructura del cernidor.

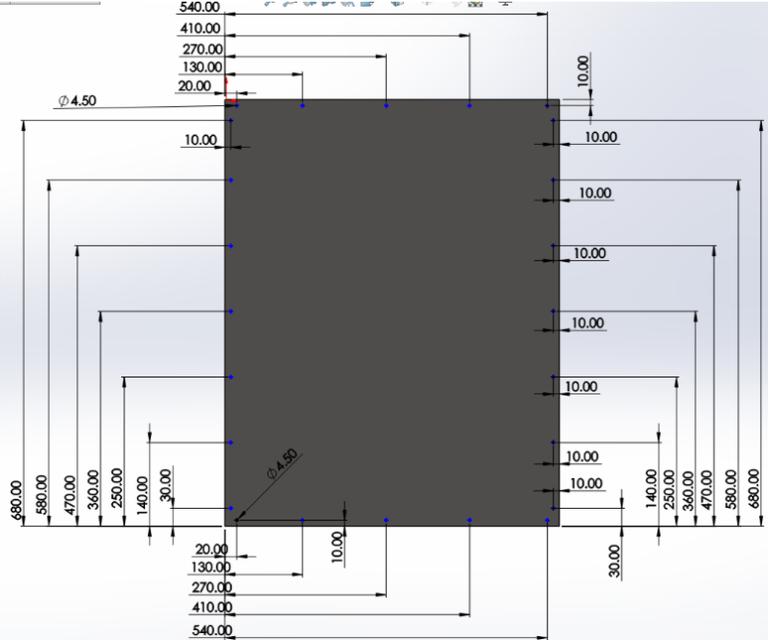


Figura 3.53. Perforaciones de la malla del cernidor. Fuente: Elaboración propia (2022).

Para la realización de este ensamble, primero se insertaron las seis esquinas y doce ángulos, y se crearon relaciones de posición coincidentes entre estas piezas. Después, se realizaron los mismos orificios de la malla (Figura 3.53) en la estructura del cernidor. La Figura 3.54a muestra la primera fase del ensamble del cernidor junto con sus perforaciones en donde ira sujeta la malla cernidora. La Figura 3.54b, ya incorpora los recubrimientos al ensamble y la malla.

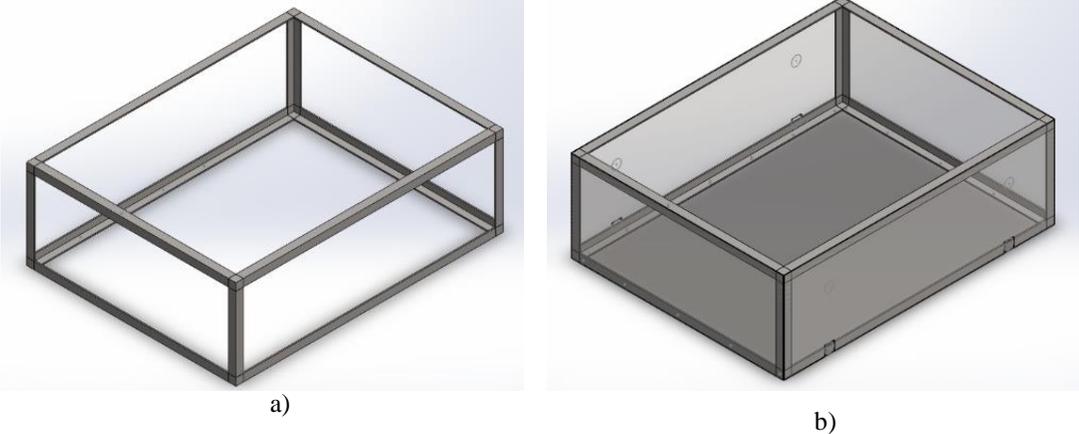
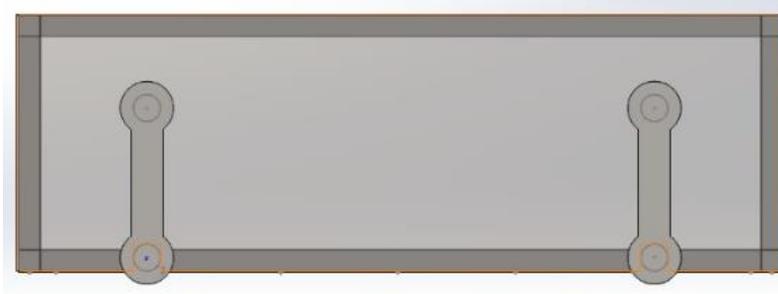


Figura 3.54. Ensamble sencillo del cernidor: a) Estructura con perforaciones, b) Colocación de la malla y los recubrimientos. Fuente: Elaboración propia (2022).

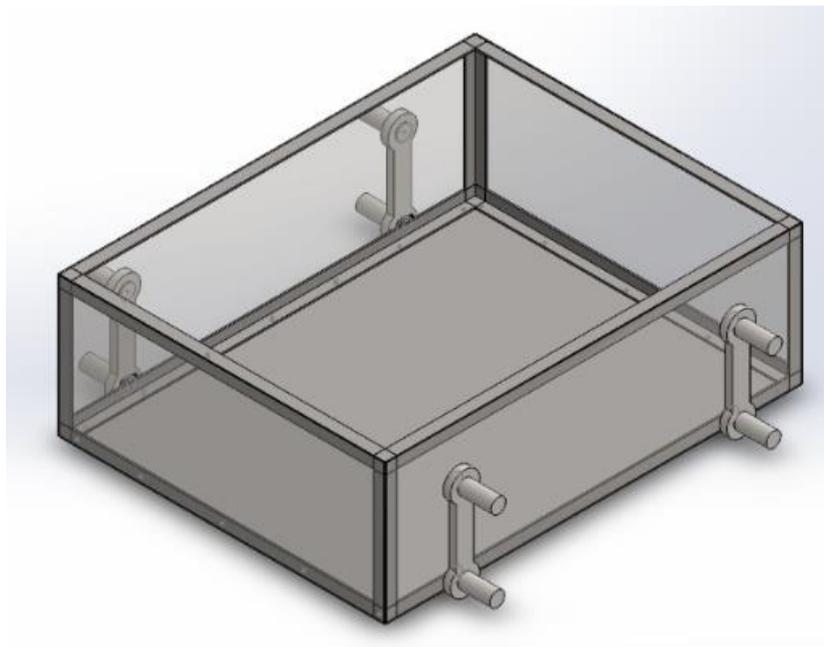
Por último, para completar el ensamblaje se agregaron cuatro soportes y cuatro rodamientos en las áreas señaladas anteriormente en la Figura 3.54b. La Figura 3.55 muestra el resultado final del ensamblaje del cernidor.



a)



b)



c)

Figura 3.55. Diseño final del cernidor: a) Vista Frontal, b) Vista Lateral, c) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.4 Diseño de otros elementos

Antes de presentar la metodología desarrollada en estas piezas, es importante mencionar que el diseño de estos elementos está basado en componentes reales que existen en el mercado y que se tienen contemplados para la implementación física del proyecto. Por lo tanto, los diseños no son muy detallados debido a que, para caso de la simulación en el software, no es necesario que todas las medidas sean lo más certeras posibles al elemento físico.

3.4.1 Diseño de chumacera de pared F205

El diseño de esta polea se dividió en dos partes: en la primera parte se croquizó y modeló toda la parte exterior al rodamiento del elemento (Figura 3.56a) y en la segunda parte el rodamiento (Figura 3.56b) para finalmente realizar el ensamble (Figura 3.56c)

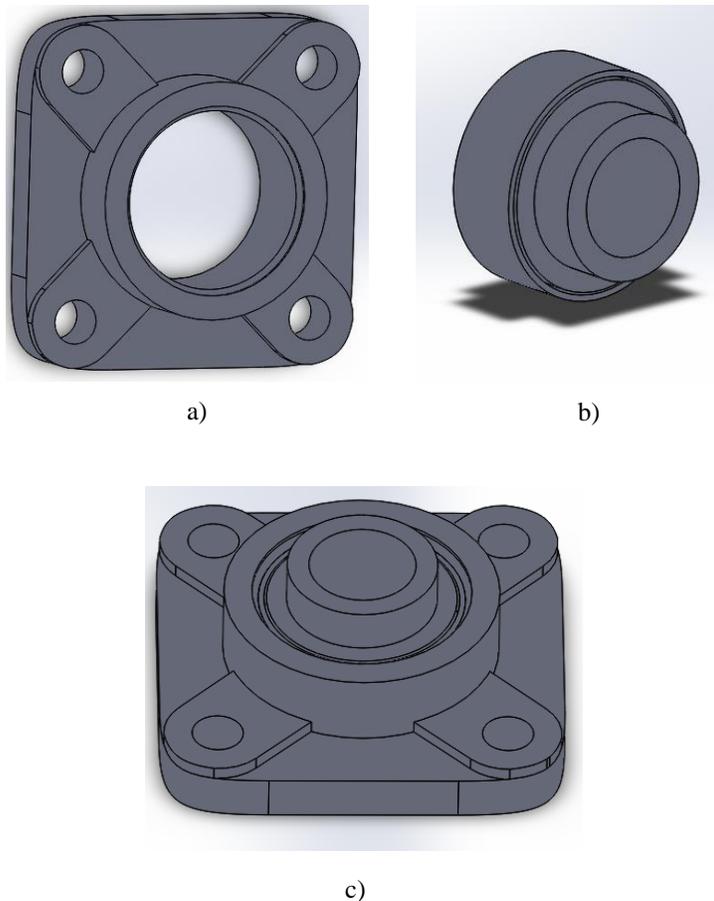
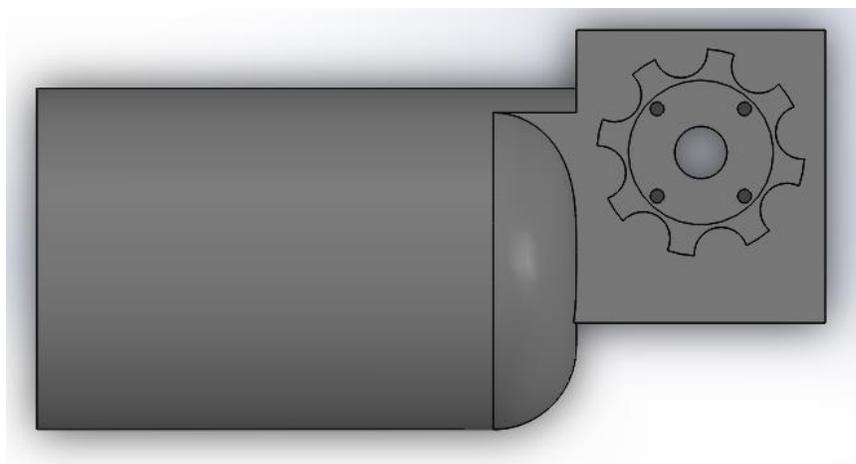


Figura 3.56. Diseño de chumacera F205: a) Parte 1, b) Parte 2, c) Ensamble. Fuente: Elaboración propia (2022).

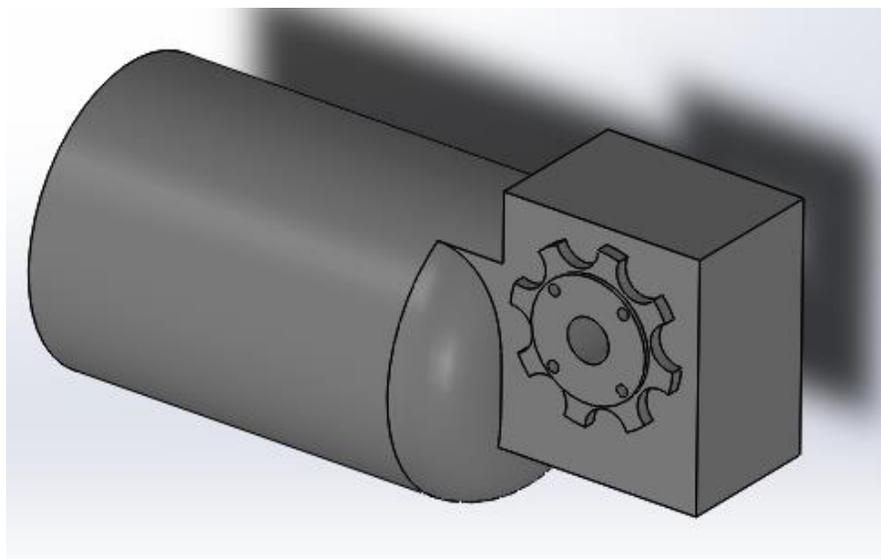
Como se pueden observar en la Figura 3.56, se utilizaron figuras geométricas básicas para el croquizado de la chumacera como arcos, circunferencias y redondeos en las operaciones de extrucción y corte.

3.4.2 Diseño de motor

El diseño del motor es muy sencillo básicamente porque lo único que es de interés en el proyecto es que la medida del rodamiento coincida con la medida del eje diseñado. El motor suministrará la potencia necesaria para hacer girar el eje y a las aspas para desterronar el material; también será el encargado de generar el movimiento de tamiz al cernidor. La Figura 3.57 muestra el diseño en 3D del motor.



a)



b)

Figura 3.57. Diseño de motor: a) Vista Lateral, b) Vista isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

3.5 Análisis estático de la estructura

Los diversos análisis estáticos que se plasmarán a continuación fueron realizados desde el complemento de SolidWorks llamado “*SolidWorks Simulation*”. Para activar este complemento desde el menú de general se da clic en “Complementos de SolidWorks” y, posteriormente, se da clic sobre “*SolidWorks Simulation*” (Figura 3.58).



Figura 3.58. Activación del complemento de SolidWorks Simulation. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Posteriormente se habilita un nuevo menú de opciones llamado “*Simulation*”. Una vez en este menú, SolidWorks ofrece muchas opciones para empezar el análisis. Cabe destacar que para cada uno de los elementos a analizar se creará un estudio nuevo (Figura 3.59) dentro de cada componente correspondiente.



Figura 3.59. Menú de operaciones del complemento SolidWorks Simulation. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

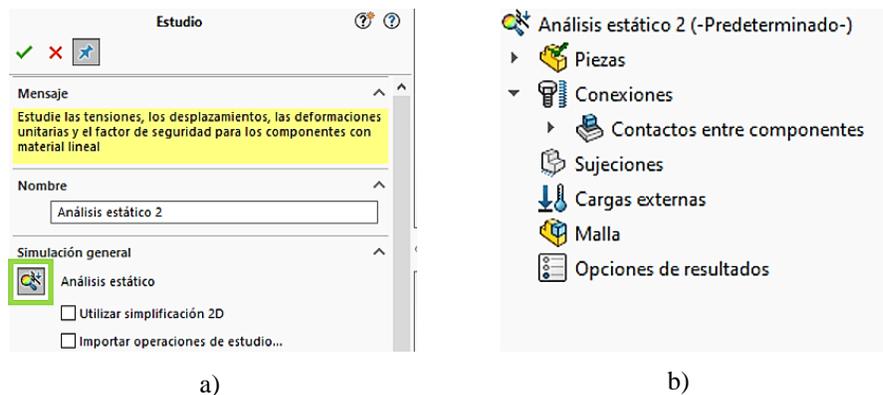


Figura 3.60. a) Creación de un nuevo estudio de Análisis Estático, b) Árbol de operaciones del análisis estático. Fuente: SolidWorks 2018 - Elaboración propia (2022).

Cuando se crea un nuevo estudio, se tiene que especificar el tipo de simulación a realizar. En este proyecto, únicamente se realizarán análisis estáticos (Figura 3.60a) a los elementos de mayor interés de la máquina. Una vez creado el estudio, aparece un menú de operaciones a utilizar; para estos análisis únicamente aplicaremos fuerzas externas a la estructura acompañadas siempre de la *Gravedad* y, siempre designaremos a un elemento como *fijo* dentro de sujeciones (Figura 3.60b). De esta forma, los elementos serán sometidos a un análisis numérico mediante el método de elementos finitos y a un análisis estático de esfuerzo - deformación utilizando el criterio de Von Mises.

3.5.1 Estructura inferior

- **CARGA EXTERNA 1: GRAVEDAD**

Debido a que el punto de referencia de la estructura es la planta, en ella se ejerce siempre una fuerza de gravedad equivalente a $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$ y como es una fuerza externa siempre presente en cualquier elemento, siempre se debe de tomar en cuenta en el análisis. La flecha roja de la Figura 3.61 indica que la fuerza de gravedad ha sido aplicada a la estructura inferior.

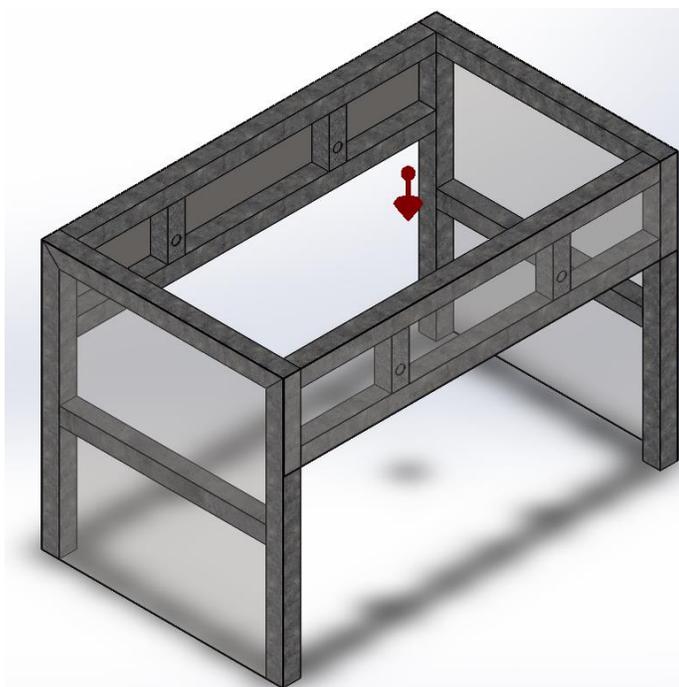


Figura 3.61. Gravedad aplicada a la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Para aplicar las otras cargas a la estructura se eligieron dos áreas en donde se aplica la mayor cantidad de fuerza debido al movimiento de vaivén que realizará la máquina cernidora una vez colocada.

- **CARGA EXTERNA 2: FUERZA NORMAL TOTAL**

En la figura 3.62 se pueden observar las flechas moradas sobre la primera cara, la cual está sometida a una fuerza normal de **75K kgf** (kilogramos-fuerza). Si bien la estructura está pensada para soportar hasta 50kg, en el análisis se contempla un factor de seguridad de 1.5.

- **CARGA EXTERNA 3: FUERZA NORMAL DISTRIBUIDA**

Para la fuerza dos, se distribuye una fuerza total de **50 kgf** sometida a dos caras de la estructura como se muestra en la Figura 3.63; estas fuerzas se encuentran, de igual manera, marcadas con flechas moradas.

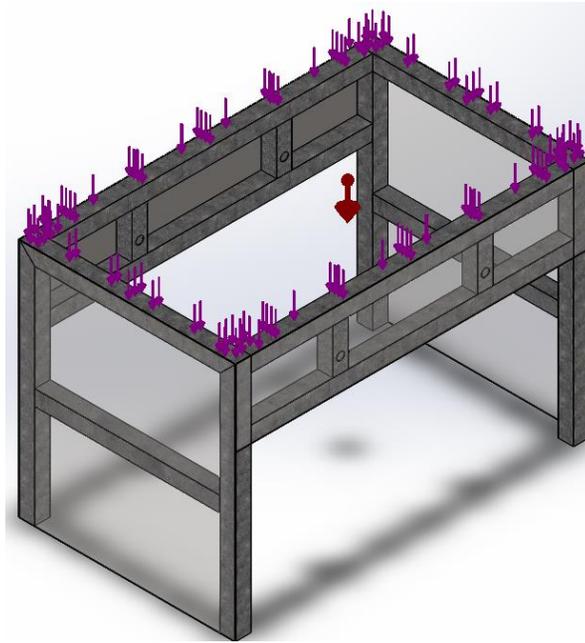


Figura 3.62. Segunda fuerza externa aplicada a la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

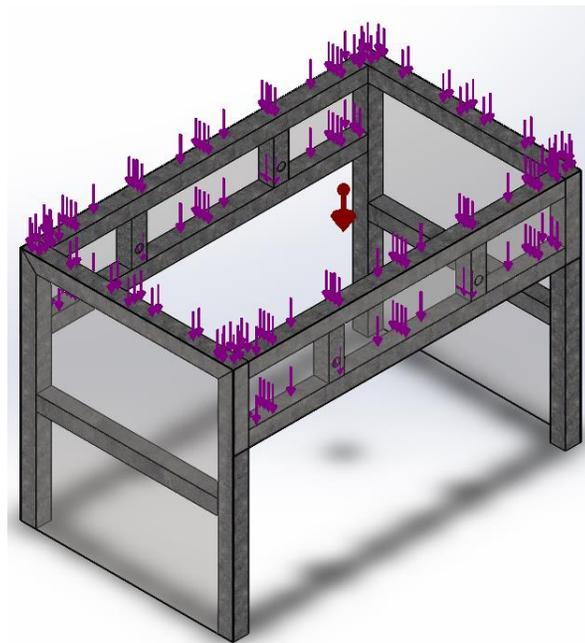


Figura 3.63. Tercera fuerza externa aplicada a la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **SOPORTES FIJOS**

Además, se colocaron cuatro soportes fijos a la estructura (señados en verde en la Figura 3.64).

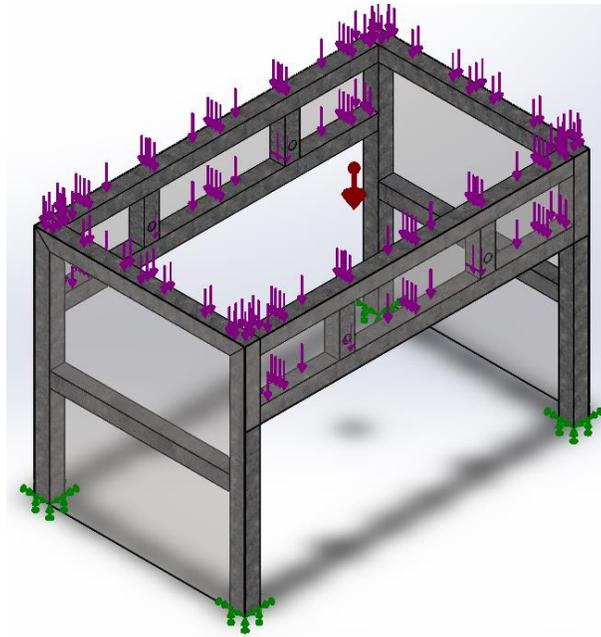


Figura 3.64. Soportes de la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **ANÁLISIS NUMÉRICO**

En la Figura 3.65 se representa el mallado creado al aplicar el análisis numérico por el método de elementos finitos con el software computacional. Este método nos permitió obtener los desplazamientos, deformaciones y tensiones resultantes en los elementos.

De esta forma, tenemos un tipo de malla sólida estándar, con un tamaño de elementos de **39.2286 mm** y una tolerancia de **1.96143 mm**, así como un número total de nodos de **17600** y un número total de elementos de **9089**.

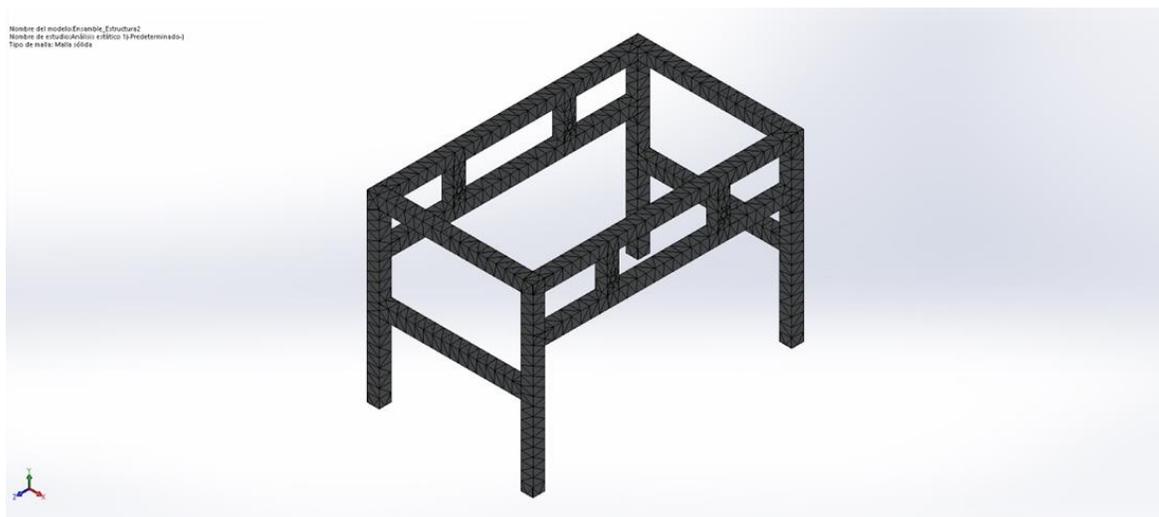


Figura 3.65. Análisis numérico de la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **FUERZAS RESULTANTES**

Como se observa en la tabla 3.6 las fuerzas son prácticamente despreciables en el eje X y Z por la forma en la que está hecho el diseño en el software, contrariamente al eje Y que prácticamente recibe toda la fuerza aplicada sobre la estructura.

Tabla 3.6. Fuerzas resultantes aplicadas sobre la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 – Elaboración Propia (2022).

Selección	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.0124268	1539.27	-0.0149253	1539.27

3.5.2 Estructura superior

- **CARGA EXTERNA 1: GRAVEDAD**

Debido a que el punto de referencia de la estructura es la planta, en ella se ejerce de igual forma una fuerza de gravedad equivalente a $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$. La flecha roja de la Figura 3.66 indica que la fuerza de gravedad ha sido aplicada a la estructura superior.

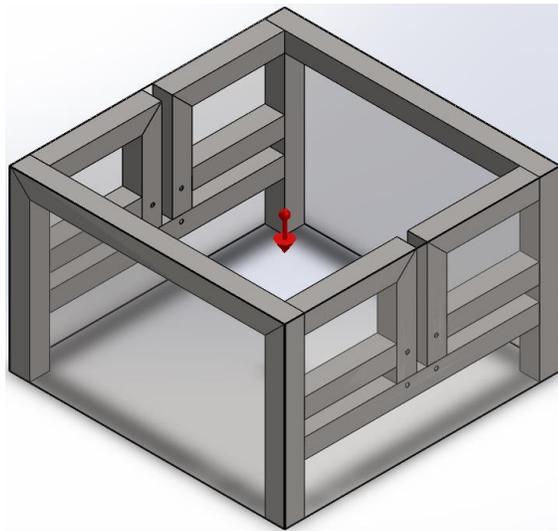


Figura 3.66. Gravedad aplicada a la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Para aplicar las demás cargas a la estructura se eligieron dos áreas en donde se aplica la mayor cantidad de fuerza debido al movimiento del desterrador.

- **CARGA EXTERNA 2: FUERZA NORMAL TOTAL**

En la figura 3.67 se puede apreciar a las flechas de color morado que representan las fuerzas aplicadas a la cara superior de la estructura; dicha fuerza es una fuerza normal de **100 kgf** distribuida a lo largo de la cara seleccionada.

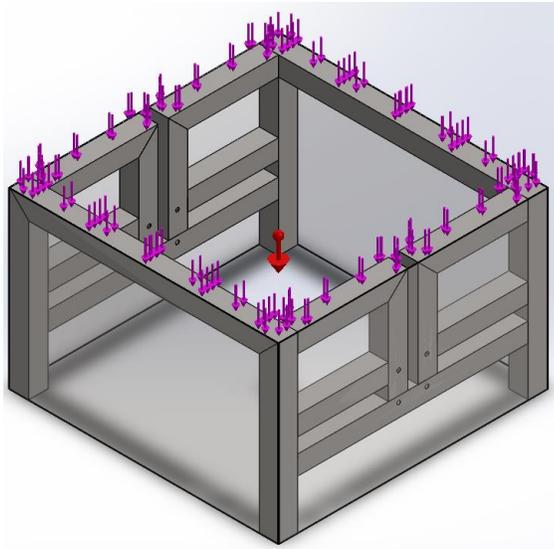


Figura 3.67. Segunda fuerza externa aplicada a la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **CARGA EXTERNA 3: FUERZA NORMAL DISTRIBUIDA**

Para la fuerza dos, se distribuye la fuerza sometida total de **50 kgf** a cuatro caras de la estructura como se muestra en la Figura 3.68; estas fuerzas se encuentran, de igual manera, marcadas con flechas moradas.

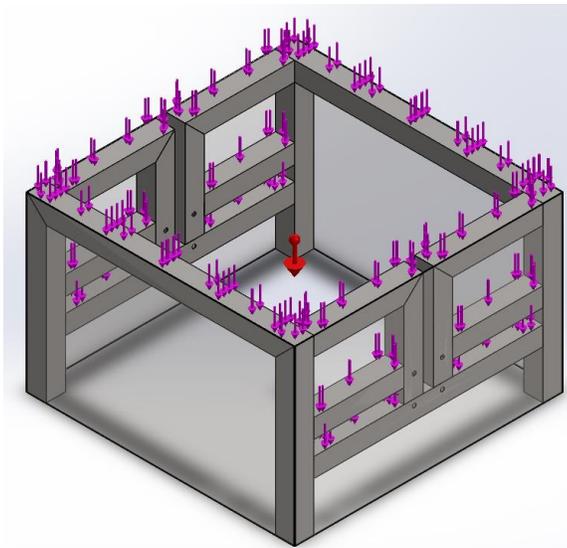


Figura 3.68. Tercera fuerza externa aplicada a la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **SOPORTES FIJOS**

Al igual que para la estructura inferior, se colocaron cuatro soportes fijos a la estructura superior: dichos soportes están representados en verde en la Figura 3.69.

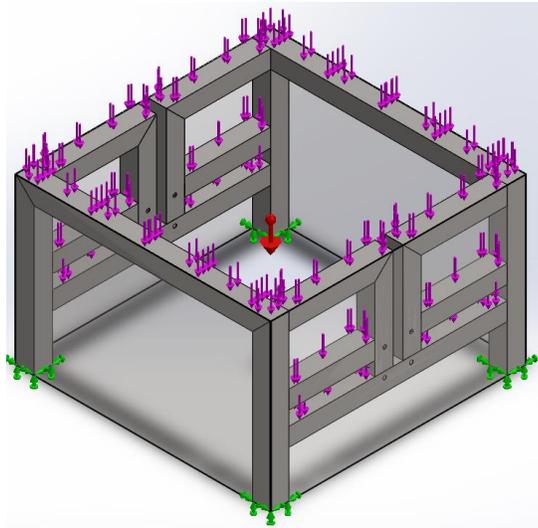


Figura 3.69. Soportes de la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **ANÁLISIS NUMÉRICO**

En la Figura 3.70 se representa el mallado creado al aplicar el análisis numérico por el método de elementos finitos con el software computacional. De esta forma, tenemos un tipo de malla sólida estándar, con un tamaño de elementos de **31.5867 mm** y una tolerancia de **1.57934 mm**, así como un número total de nodos de **34349** y un número total de elementos de **18549**.

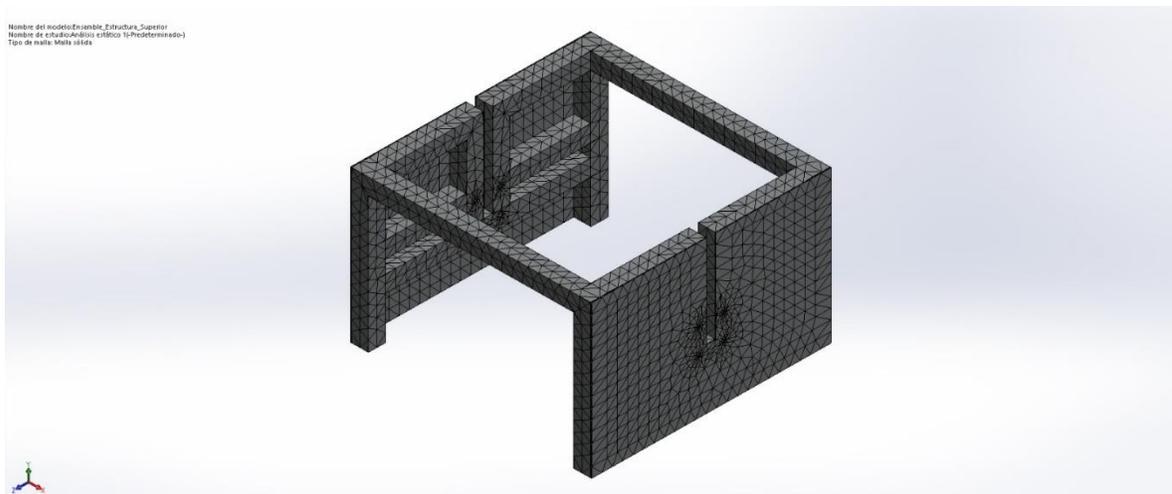


Figura 3.70. Análisis numérico de la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **FUERZAS RESULTANTES**

Como se observa en la tabla 3.7, de igual forma que para la estructura inferior, las fuerzas son prácticamente despreciables en el eje X y Z por la forma en la que está hecho el diseño en el software, contrariamente al eje Y que prácticamente recibe toda la fuerza aplicada sobre la estructura.

Tabla 3.7. Fuerzas resultantes aplicadas sobre la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 – Elaboración Propia (2022).

Selección	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0.281167	1786.39	-0.0833167	1786.39

3.6 Análisis estático del desterronador

- **CARGA EXTERNA 1: GRAVEDAD**

Debido a que el punto de referencia del desterronador es la planta, en ella se ejerce de igual forma una fuerza de gravedad equivalente a $9.81 \text{ m} / \text{s}^2$. La flecha roja de la Figura 3.71 indica que la fuerza de gravedad ha sido aplicada al desterronador.

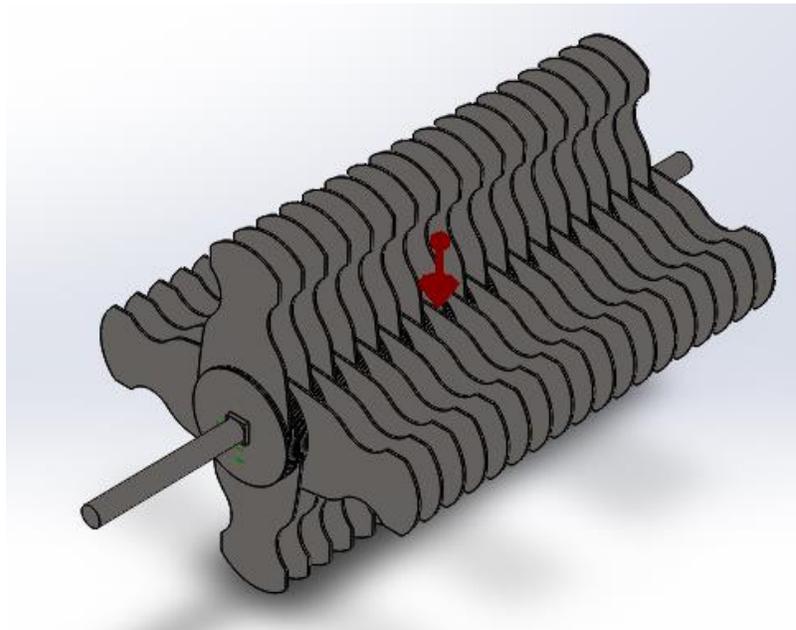


Figura 3.71. Gravedad aplicada al desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Para aplicar las diferentes cargas a las aspas se seleccionaron las caras en L del mazo superior y lateral, mismas en donde se aplica la mayor cantidad de fuerza para triturar la arcilla.

- **CARGA EXTERNA 2: FUERZA NORMAL TOTAL**

En la figura 3.72 se puede observar que las flechas moradas señalan las caras de las aspas que fueron sometidas a una fuerza total distribuida de **8 kgf** (kilogramos-fuerza). Cabe mencionar que, para este análisis, se aplicaron un total de 18 cargas totales distribuidas a cada una de las cruces de las aspas que conforman el ensamble, dando así un total de **144 kgf**.

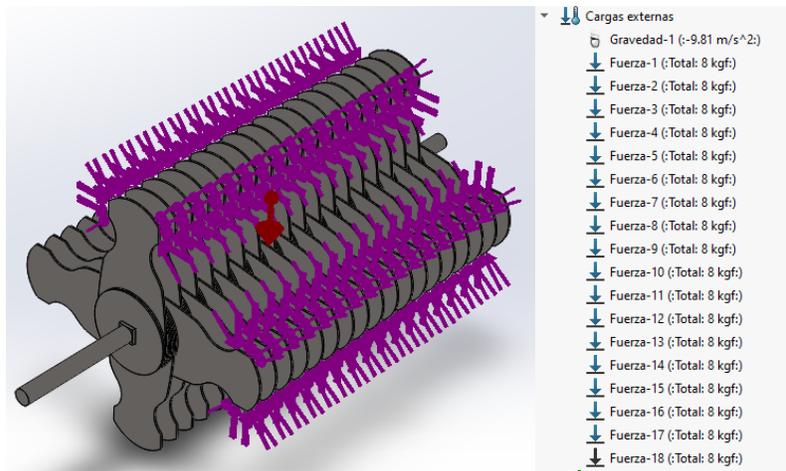


Figura 3.72. Fuerzas externas distribuidas a lo largo de las aspas. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **SOPORTES FIJOS**

Para este elemento, se colocó una de las caras del eje como soporte fijo (señalado en un rectángulo azul en la Figura 3.73). Si bien, el motor transmitirá potencia al eje y este a su vez a las aspas, para estos fines se colocó fijo en su posición.

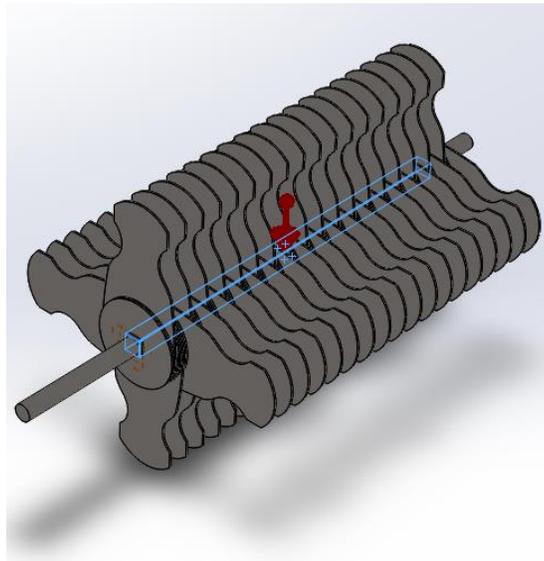


Figura 3.73. Soportes del desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **ANÁLISIS NUMÉRICO**

La Figura 3.74 representa el mallado creado al aplicar el análisis numérico por el método de elementos finitos con el software computacional. De esta forma, tenemos un tipo de malla sólida estándar, con un tamaño de elementos de **14.4381 mm** y una tolerancia de **0.721904 mm**, así como un número total de nodos de **214332** y un número total de elementos de **126627**.

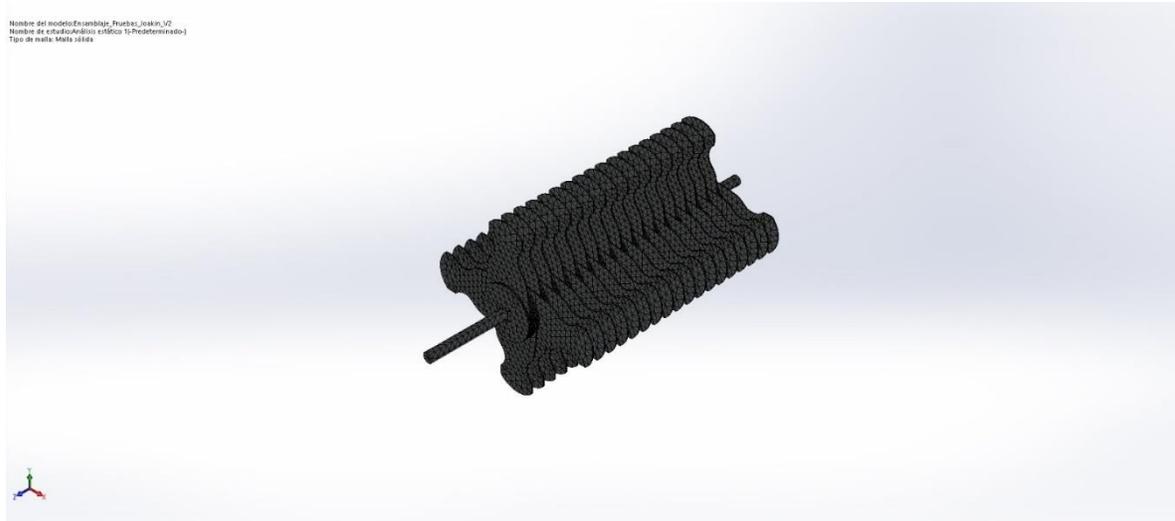


Figura 3.74. Análisis numérico del ensamble eje-aspas. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **FUERZAS RESULTANTES**

Como se observa en la tabla 3.8, las fuerzas son prácticamente despreciables en el eje X y Z por la forma en la que está hecho el diseño en el software, contrariamente al eje Y que prácticamente recibe toda la fuerza aplicada sobre las aspas.

Tabla 3.8. Fuerzas resultantes aplicadas sobre las aspas del desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 – Elaboración Propia (2022).

Selección	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	399.294	1216.68	0.00276406	1280.52

3.7 Análisis estático del cernidor

- **CARGA EXTERNA 1: GRAVEDAD**

Al igual que para los anteriores elementos se aplica una fuerza de gravedad equivalente a **9.81 m / s²**. La flecha roja de la Figura 3.75 indica que la fuerza de gravedad ha sido aplicada a la malla del cernidor.

- **CARGA EXTERNA 2: FUERZA NORMAL TOTAL**

En la figura 3.76 se puede observar en azul las caras seleccionadas que fueron sometidas a una fuerza total distribuida de **15 kgf** (kilogramos-fuerza); esta carga (representadas con flechas azules) se distribuye a lo largo de la malla. Cabe mencionar que debido a que el diseño no cuenta con las perforaciones de una malla, se le aplica una fuerza mayor a la normal para que los resultados obtenidos sean los más cercanos a la realidad posible.

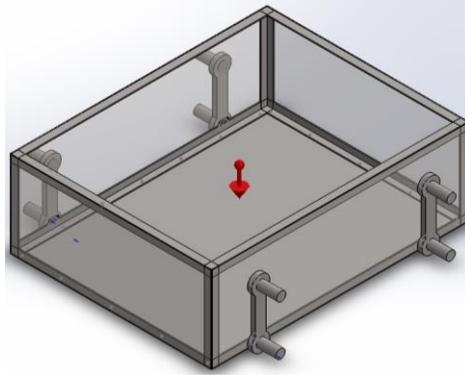


Figura 3.75. Gravedad aplicada al cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

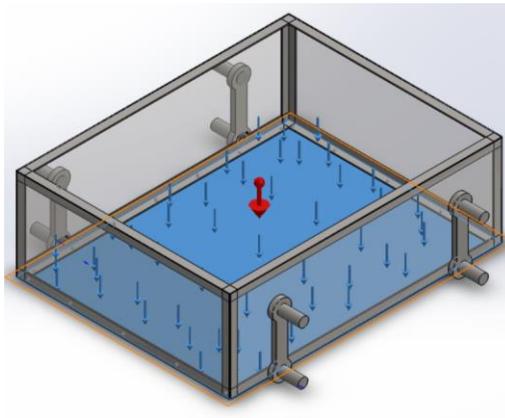


Figura 3.76. Gravedad aplicada al cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **SOPORTES FIJOS**

Para este elemento, se colocó, como soporte fijo, las esquinas superiores y a las aristas grandes inferiores tal y como se muestra en la Figura 3.77. Esto se debe al movimiento de vaivén que presentara el cernidor.

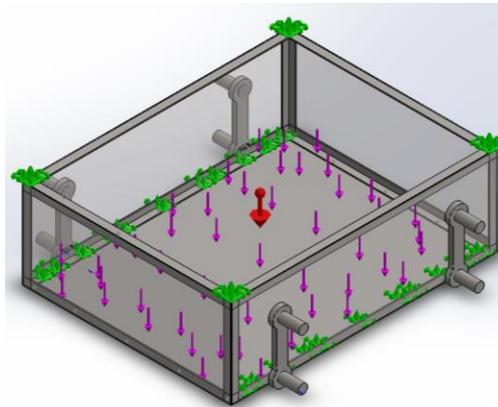


Figura 3.77. Soportes del cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **ANÁLISIS NUMÉRICO**

La Figura 3.78 representa el mallado creado al aplicar el análisis numérico por el método de elementos finitos con el software computacional. De esta forma, tenemos un tipo de malla sólida estándar, con un tamaño de elementos de **31.6532 mm** y una tolerancia de **1.58266 mm**, así como un número total de nodos de **24492** y un número total de elementos de **12672**.



Figura 3.78. Análisis numérico del cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

- **FUERZAS RESULTANTES**

Como se observa en la tabla 3.9, de igual forma que para los anteriores componentes, las fuerzas son prácticamente despreciables en el eje X y Z por la forma en la que está hecho el diseño en el software, contrariamente al eje Y que prácticamente recibe toda la fuerza aplicada sobre la estructura.

Tabla 3.9. Fuerzas resultantes aplicadas sobre el cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 – Elaboración Propia (2022).

Selección	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-0.0872784	372.843	0.112334	372.843

Capítulo 4 . Resultados.

4.1 Resultados del diseño mecánico

El ensamble final de la máquina con todos sus elementos, se presenta en la Figura 4.1.

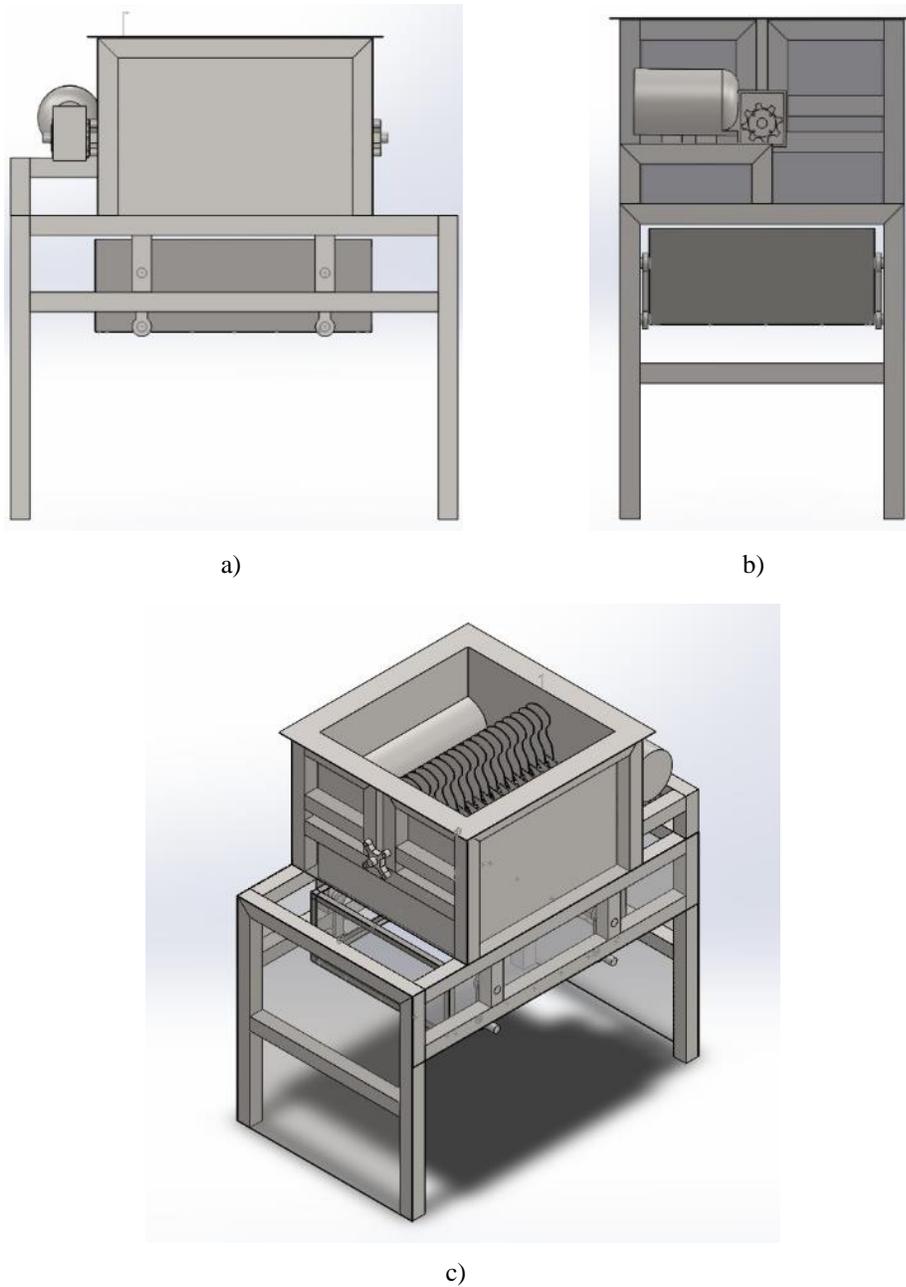


Figura 4.1 Ensamble final de la máquina desterronadora-cernidora de arcilla: a) Vista Frontal, b) Vista Lateral, c) Vista Isométrica. Fuente: Elaboración propia (2022).

4.2 Resultados del análisis estático

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de SolidWorks del análisis estático aplicado a los elementos de mayor interés de la máquina.

4.2.1 Estructura inferior

Como se puede observar en la Figura 4.2, de acuerdo a los resultados arrojados por el criterio de Von Mises, el coeficiente mínimo de tensión es $8.814 \frac{N}{m^2}$ y el máximo coeficiente de tensión es $1.220 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$.

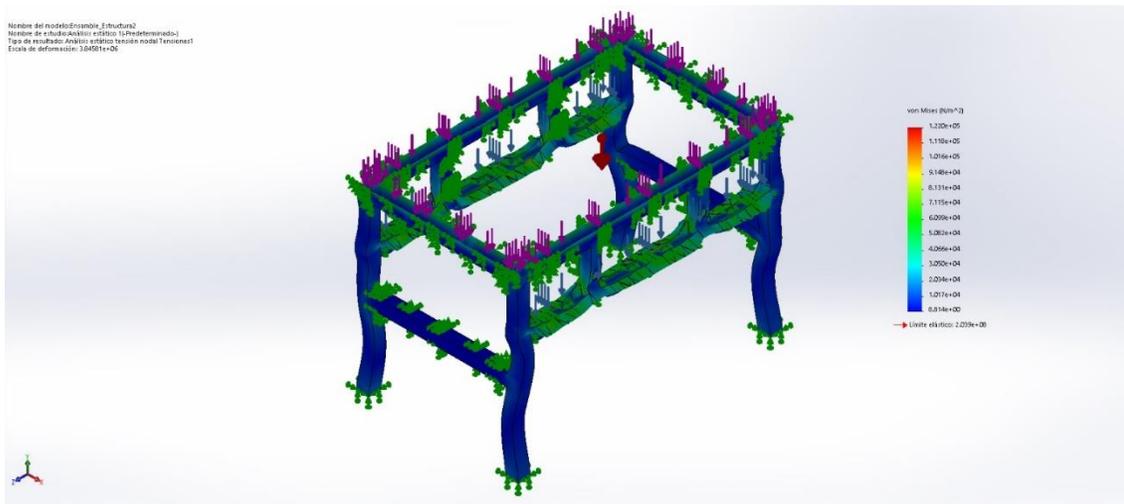


Figura 4.2. Tensiones de Von Mises de la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

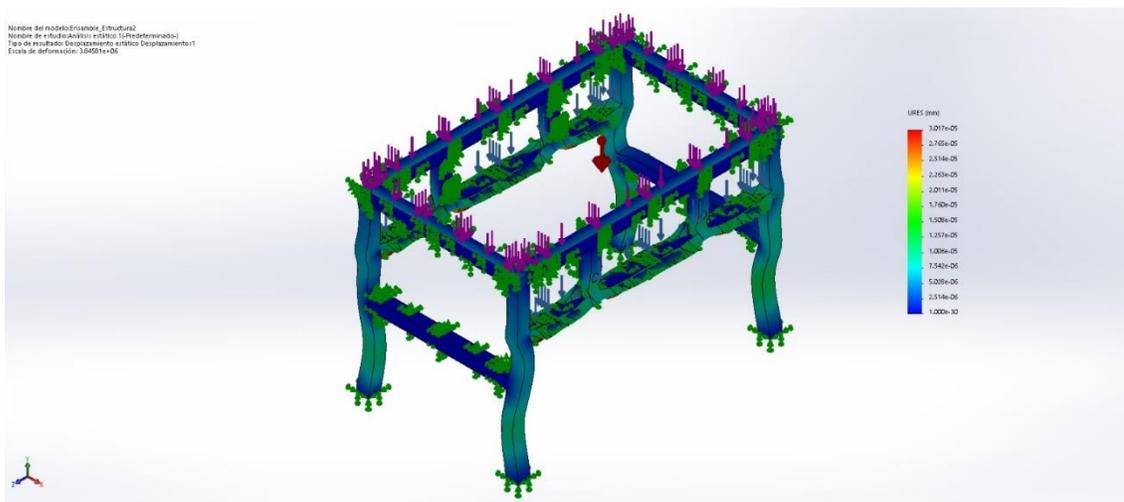


Figura 4.3. Desplazamientos de la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

En la Figura 4.3 se observa el que el coeficiente mínimo de desplazamiento es **0 mm**, haciéndolo prácticamente despreciable y el máximo coeficiente de desplazamiento es **$3.017 \times 10^{-5} \text{ mm}$** .

Por último, podemos observar en la Figura 4.4 la deformación unitaria equivalente de la estructura cuyo coeficiente mínimo de deformación es **3.232×10^{-11}** el cual lo hace despreciable y el máximo coeficiente de tensión es **4.747×10^{-7}** .

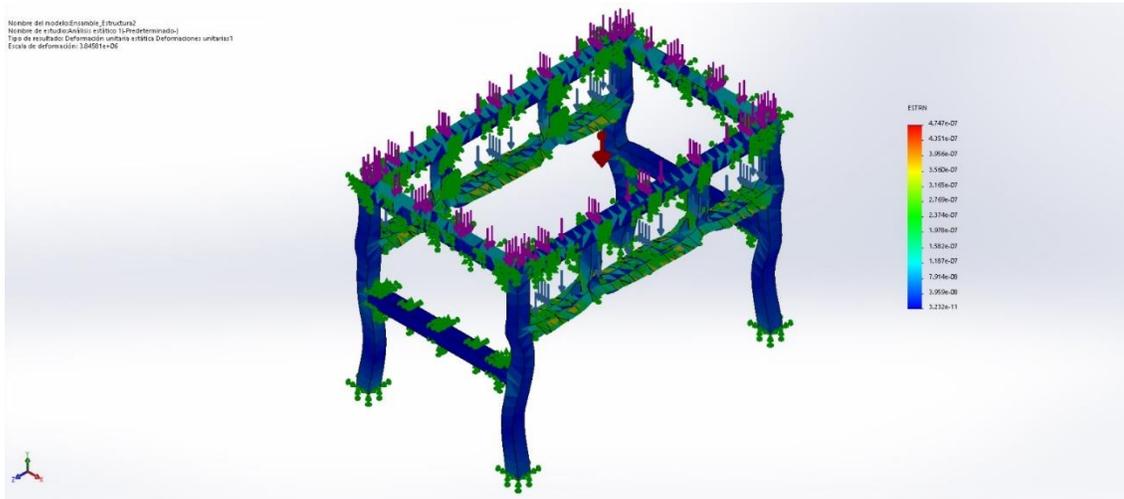


Figura 4.4. Deformaciones de la estructura inferior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

4.2.2 Estructura Superior

Como se puede observar en la Figura 4.5, de acuerdo a los resultados arrojados por el criterio de Von Mises, el coeficiente mínimo de tensión es **$1.885 \times 10^4 \frac{N}{m^2}$** y el máximo coeficiente de tensión es **$5.287 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$** .

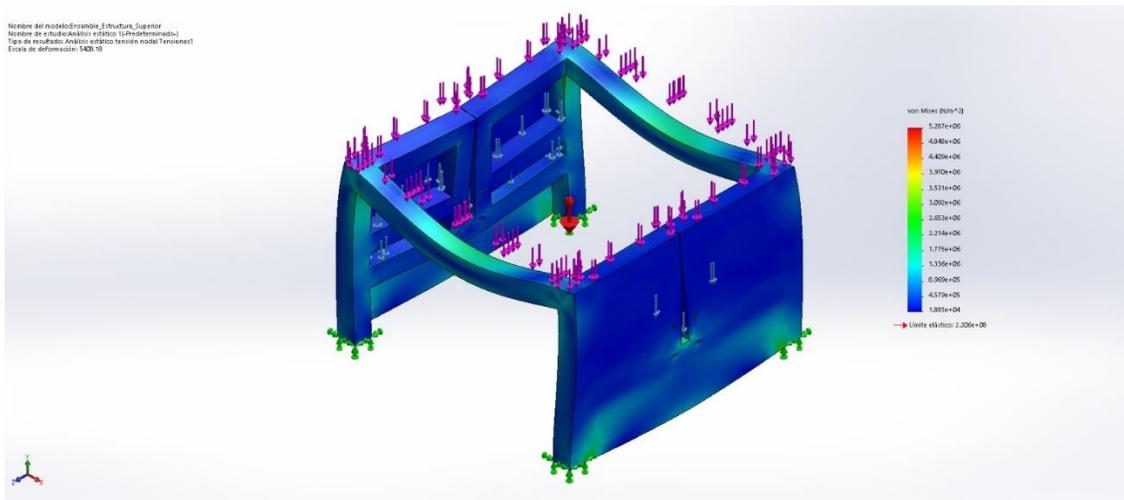


Figura 4.5. Tensiones de Von Mises de la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

En la Figura 4.6 se observa el que el coeficiente mínimo de desplazamiento es **0 mm**, haciéndolo prácticamente despreciable y el máximo coeficiente de desplazamiento es **$1.324 \times 10^{-2} \text{ mm}$** .

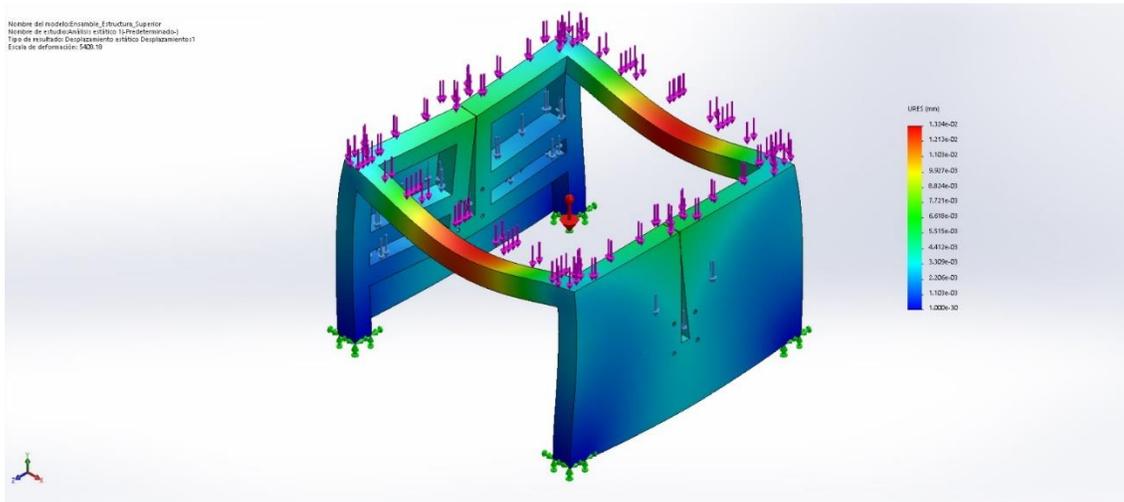


Figura 4.6. Desplazamientos de la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Por último, podemos observar en la Figura 4.7 la deformación unitaria equivalente de la estructura cuyo coeficiente mínimo de deformación es **4.489×10^{-8}** el cual lo hace despreciable y el máximo coeficiente de tensión es **1.240×10^{-5}** .

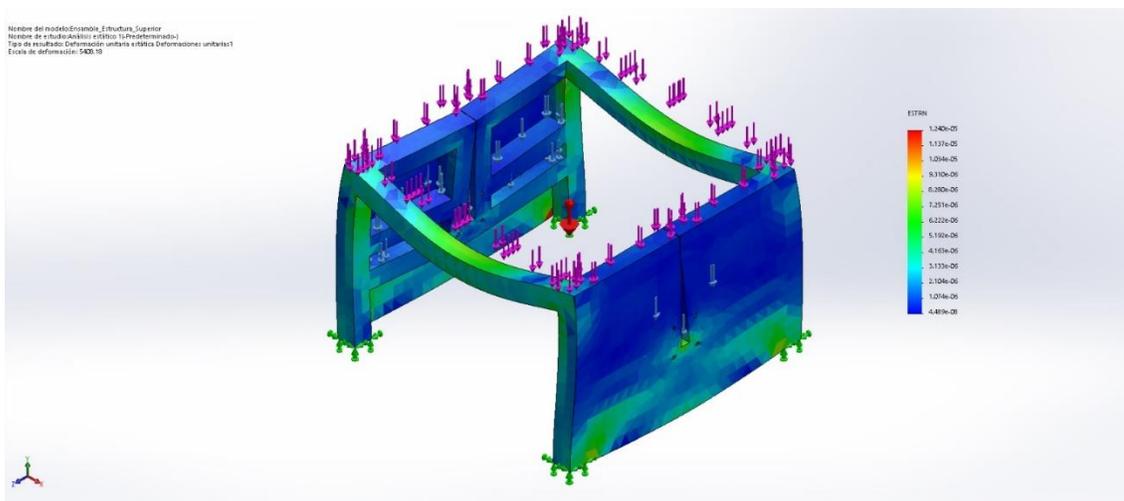


Figura 4.7. Deformaciones de la estructura superior. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

4.2.3 Ensamble del desterronador

Como se puede observar en la Figura 4.8, de acuerdo a los resultados arrojados por el criterio de Von Mises, el coeficiente mínimo de tensión es **$8.609 \times 10^{-6} \frac{N}{m^2}$** y el máximo coeficiente de tensión es **$2.138 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$** .

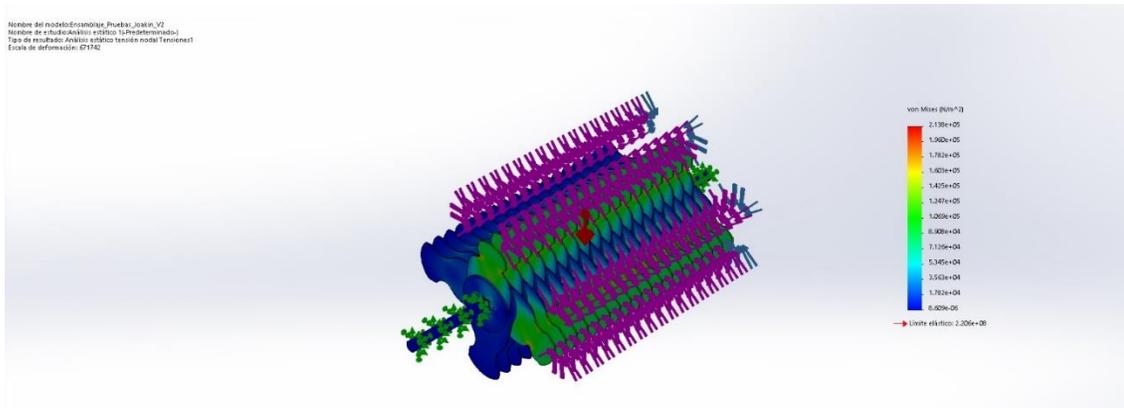


Figura 4.8. Tensiones de Von Mises del desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 – Elaboración propia (2022).

En la Figura 4.9 se observa el que el coeficiente mínimo de desplazamiento es **0 mm**, haciéndolo prácticamente despreciable y el máximo coeficiente de desplazamiento es **$1.533 \times 10^{-4} \text{ mm}$** .

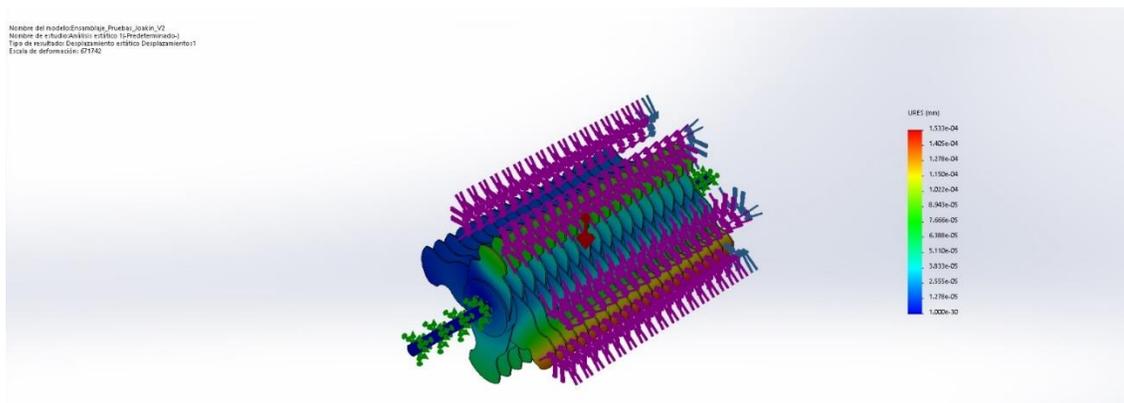


Figura 4.9. Desplazamientos del desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

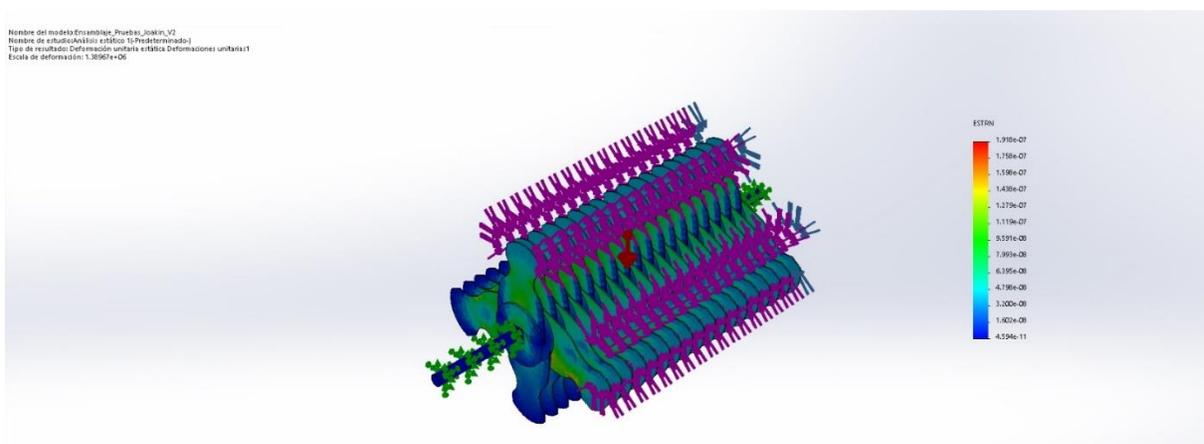


Figura 4.10. Deformaciones del desterronador. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Por último, podemos observar en la Figura 4.10 la deformación unitaria equivalente de la estructura cuyo coeficiente mínimo de deformación es 3.285×10^{-11} el cual lo hace despreciable y el máximo coeficiente de tensión es 7.418×10^{-7} .

4.2.4 Ensamble del cernidor

Como se puede observar en la Figura 4.11, de acuerdo a los resultados arrojados por el criterio de Von Mises, el coeficiente mínimo de tensión es $1.215 \times 10^2 \frac{N}{m^2}$ y el máximo coeficiente de tensión es $1.579 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$.

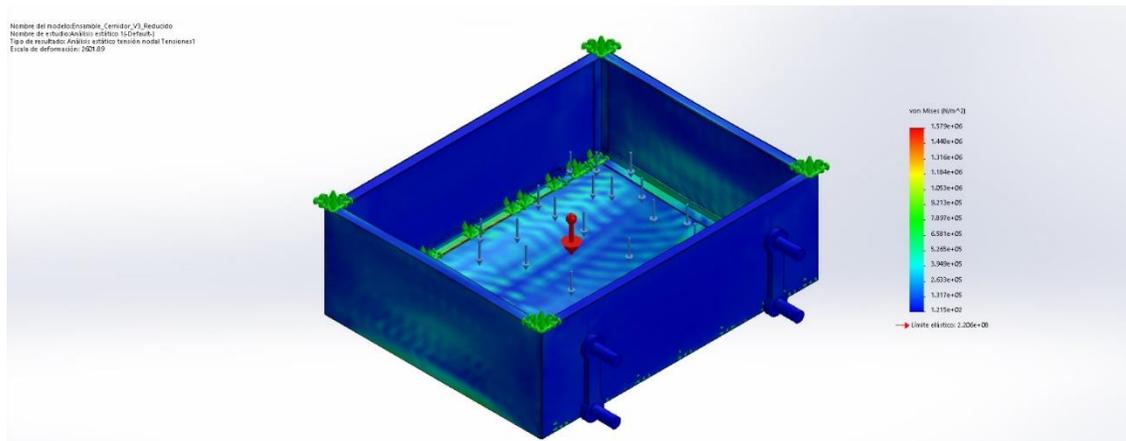


Figura 4.11. Tensiones de Von Mises del cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

En la Figura 4.12 se observa el que el coeficiente mínimo de desplazamiento es 0 mm , haciéndolo prácticamente despreciable y el máximo coeficiente de desplazamiento es $2.763 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

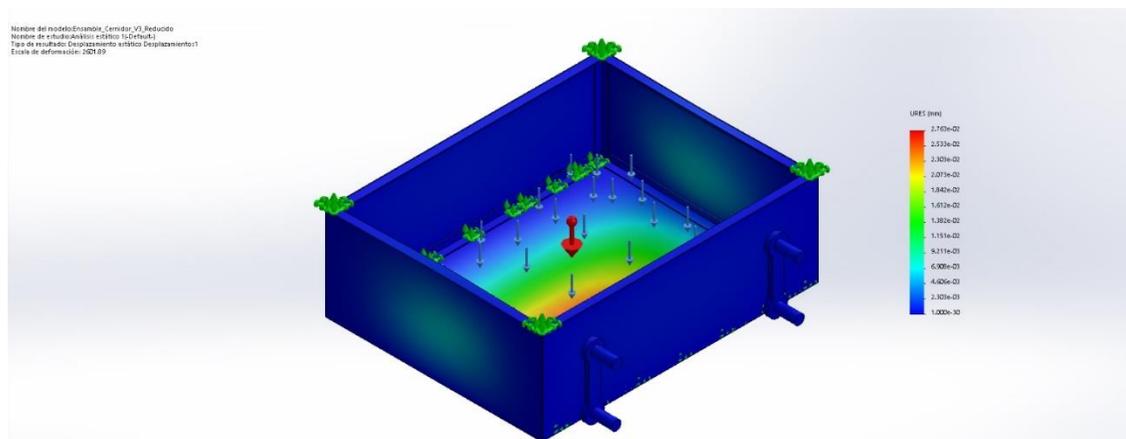


Figura 4.12. Desplazamientos del cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

Por último, podemos observar en la Figura 4.13 la deformación unitaria equivalente de la estructura cuyo coeficiente mínimo de deformación es 2.150×10^{-9} el cual lo hace despreciable y el máximo coeficiente de tensión es 4.168×10^{-6} .

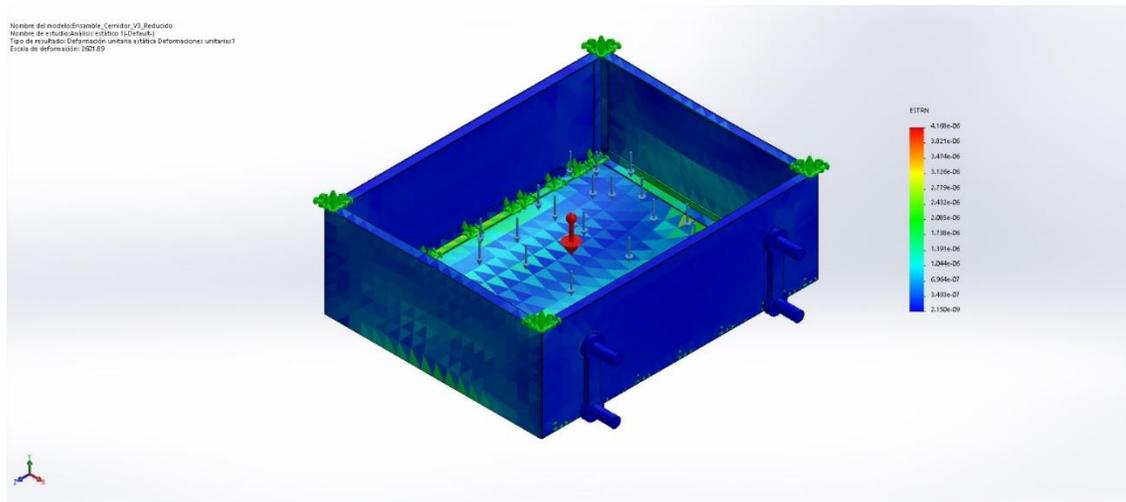


Figura 4.13 Deformaciones del cernidor. Fuente: SolidWorks 2018 (2022).

4.3 Discusión de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos se tiene que los primeros bocetos y modelado 3D de los elementos que conforman la máquina, particularmente de la estructura y del desterronador, si bien cumplían su función de manera óptima y sin previsiones de fallo bajo condiciones normales de trabajo según el análisis también realizado al primer diseño (Ver Anexos), el costo del proyecto se elevaba más de lo estipulado y también el peso neto de la maquinaria, esto debido a que la mayoría de sus elementos eran sólidos.

Con el rediseño de los elementos que aportaban mayor cantidad de volumen y peso extra a la máquina, se logró que disminuyera el costo de fabricación y el peso de la máquina sin comprometer las características de resistencia, funcionalidad y seguridad de esta.

Después de comparar los análisis del primer y último diseño de algunos de los componentes de la máquina, los últimos resultados arrojados no difieren en gran medida con los resultados del análisis de los primeros diseños. Con ello, se obtiene un ahorro en costos en cuanto se lleve a cabo la implementación de la maquinaria, sino también una mejora en la calidad laboral de los alfareros al tener una máquina mejor adaptada a las necesidades del proceso.

Conclusiones y Recomendaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el software CAD tras efectuar los análisis estáticos del último diseño de la estructura inferior y superior, de los elementos que conforman la desterronadora (eje, aspas y discos) y de los elementos que conforman al cernidor (malla y estructura) se puede inferir que diseño general de la máquina y el material aplicado a cada una de las piezas satisface los requerimientos de carga que comúnmente manejan los artesanos del municipio de Cohuecan sin presentar deformaciones ni desplazamientos considerables.

Si bien, los resultados del análisis estático aplicado al primer diseño de cada elemento de interés de la máquina no discrepan mucho del último diseño, si existe un notorio cambio en la cantidad de material usada con respecto al prototipo final y, por lo tanto, en el peso y costo que tendría toda la máquina una vez implementada en físico.

Cabe destacar que la simulación de movimiento del mecanismo de desterronado y cernido no se aprecia en este trabajo; sin embargo, sí se tiene presente seguir perfeccionando este prototipo, incorporando más detalles y mejoras en el diseño de la máquina.

Referencias

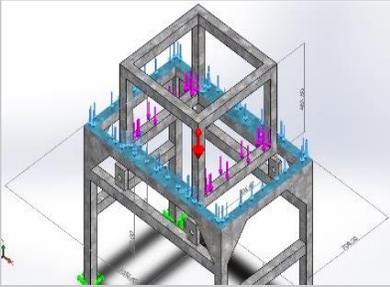
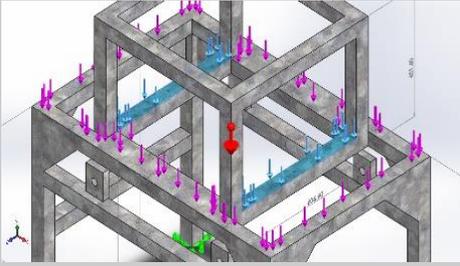
- Abasolo Bilbao, M., Corral Saiz, J., & Iriondo Plaza, E. (15 de 05 de 2017). *Universidad del País Vasco*. Obtenido de Open Course Ware: <https://ocw.ehu.es/course/view.php?id=441>
- Armas, I. H. (2020). Los costos de producción artesanal para la actividad de alfarería en la Parroquia La Victoria cantón Pujilí. *RECIMUNDO*, 360-369.
- Beer, P. F. (2010). Introducción. El concepto de esfuerzo. En E. R. Johnston, *Mecánica de Materiales* (págs. 2-27). México: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Cáceres, S. (2013). Actividades económicas, industriales y artesanales. . Nicaragua.
- Calderón Salcedo, A. M. (2020). Diseño de una máquina cernidora de arena verde para el proceso de fabricación artesanal de utensilios de aluminio en el caserío de Chacupe-Lambayeque. Chiclayo, Perú.
- Domínguez Gurría, M. A., Jaen Rendón, U. A., Garibaldi Rodríguez, A., & Vladimir, Z. J. (2021). Análisis numérico del mecanismo de una trituradora de PET mediante el método de elementos finitos. *Revista Ingeniantes*, 55-58.
- G. Budynas, R., & Nisbett, J. (2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. México: Mc Graw Hill Educación.
- García Ayala, O. M., & Guayasamín De La Cruz, V. H. (Septiembre de 2020). Diseño y construcción de una trituradora-tamizadora de arcilla para la elaboración de alfarería , con capacidad de 100 Kg/h, para la Parroquia La Victoria, Provincia del Cotopaxi. Quito, Cotopaxi, Ecuador.
- Giesecke, F. E., Mitchell, A., & Spencer, H. C. (2006). *Dibujo y comunicación gráfica*. México: PEARSON Educación.
- Gómez González, S. (2015). *SolidWorks Simulation*. México: Alfaomega.
- González, S. G. (2010). *SolidWorks*. Méixco: Marcombo, ediciones técnicas.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mecánica de materiales*. México: Pearson Educación.
- Howard, M. (18 de 10 de 2018). Motores de transmisión directa y sensores directos . Cambridge, Reino Unido.
- Jensel, C., D. Helsel, J., & R. Short, D. (2004). *Dibujo y diseño en ingeniería*. México: Mc Graw Hill.
- Johnston, R. (2017). *Mecánica Vectorial para Ingenieros. Estática*. México: Mc Graw Hill Education.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: PEARSON Educación.
- Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. (2006). Diseño asistido por computador. *Revistas de investigación Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 9.

Vásquez, J. A. (2009). *Análisis y diseño de piezas de máquinas con CATIA V5 (Método de elementos finitos)*. México: Alfaomega.

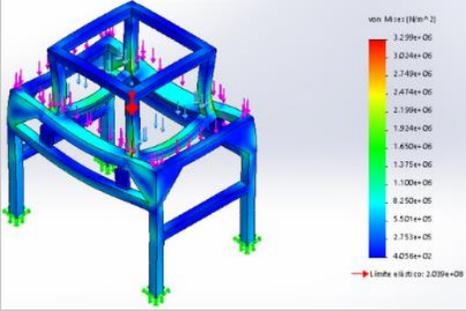
Anexos

Análisis estático realizado a la primera propuesta de diseño de algunos elementos de la máquina.

I. ESTRUCTURA

	Estructura Inferior	Estructura Superior
<i>Dimensiones</i>	708.20 mm x 1056.60 mm x 796.35 mm	606.60 mm x 606.60 mm x 451.60 mm
<i>Material</i>	Acero al carbono no aleado	
<i>Carga máxima soportada</i>	100 kg totales 	100 kg distribuidos 

Coefficientes de tensión, deformación y desplazamiento de la estructura según su carga máxima soportada

<i>Coefficiente mínimo de tensión</i>	$4.056 \times 10^2 \frac{N}{m^2}$	
<i>Coefficiente máximo de tensión</i>	$3.299 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$	

<i>Coefficiente mínimo de deformación</i>	1.950×10^{-9}	
<i>Coefficiente máximo de deformación</i>	1.063×10^{-5}	
<i>Coefficiente mínimo de desplazamiento</i>	0 mm	
<i>Coefficiente máximo de desplazamiento</i>	1.598×10^2 mm	

II. EJE

<i>Dimensiones</i>	25.4 mm x 25.4 mm x 710 mm	
<i>Material</i>	Acero al carbón no aleado	
<i>Carga máxima soportada</i>	50 kg totales	

Coeficientes de tensión, deformación y desplazamiento del eje según su carga máxima soportada

<i>Coeficiente mínimo de tensión</i>	$1.847 \times 10^4 \frac{N}{m^2}$	
<i>Coeficiente máximo de tensión</i>	$1.623 \times 10^7 \frac{N}{m^2}$	
<i>Coeficiente mínimo de deformación</i>	1.861×10^{-6}	
<i>Coeficiente máximo de deformación</i>	5.808×10^{-5}	
<i>Coeficiente mínimo de desplazamiento</i>	0 mm	
<i>Coeficiente máximo de desplazamiento</i>	$1.063 \times 10^{-1} \text{ mm}$	

III. ASPAS Y DISCOS

	Aspas	Discos
<i>Dimensiones</i>	290 mm x 152 mm x 10 mm	152 mm de diámetro x 10 mm de espesor
<i>Material</i>	Acero al carbón no aleado	

Coefficientes de tensión, deformación y desplazamiento de la matriz de aspas según una carga máxima distribuida de 75 kg

<i>Coefficiente mínimo de tensión</i>	$6.103 \times 10^1 \frac{N}{m^2}$		
	$2.507 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$		
<i>Coefficiente máximo de tensión</i>	$2.507 \times 10^5 \frac{N}{m^2}$		
	$6.103 \times 10^1 \frac{N}{m^2}$		
<i>Coefficiente mínimo de deformación</i>	6.989×10^{-10}		
	9.142×10^{-7}		
<i>Coefficiente máximo de deformación</i>	9.142×10^{-7}		
	6.989×10^{-10}		
<i>Coefficiente mínimo de desplazamiento</i>	0 mm		
	$2.045 \times 10^4 \text{ mm}$		
<i>Coefficiente máximo de desplazamiento</i>	$2.045 \times 10^4 \text{ mm}$		
	0 mm		

Glosario

C

- **Cernidor:** Aparato que sirve para separar la parte final de materia prima (harina, arcilla, tierra, etc.), a las partículas más grandes como piedras, hojas u otros elementos.
- **Croquis:** Es la base para crear un modelo 3D y cualquier otra operación en incorporados en los softwares de dibujo asistido por computadora. Las operaciones son la base para crear piezas, las cuales se pueden combinar para crear ensamblajes.

D

- **Deformación:** Cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a tensiones internas producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo, la ocurrencia de dilataciones térmicas o la aparición de efectos viscoelásticos.
- **Desplazamiento:** Define el movimiento longitudinal, transversal y giro en una sección cualquiera de una barra y representa la resultante o acumulación de deformaciones efectivas y de movimientos de sólido rígido hasta la sección considerada.
- **Desterronadora:** Máquina destinada a moler y pulverizar terrones de un cierto material.
- **Discretización:** Se refiere a la necesidad de modelar objetos geométricos continuos con base a una cantidad finita y adecuada de información para los fines requeridos por una aplicación específica.

E

- **Esfuerzo:** Conjunto de fuerzas internas a las que está sometido un cuerpo a consecuencia de las sollicitaciones o acciones que actúan sobre él. Estas fuerzas internas son el resultado de la interacción de unas partículas del cuerpo sobre las otras.
- **Esfuerzo de Von Mises:** Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.
- **Extrucción:** Tipo de operación incluida en cualquier software CAD/CAM que permite dar una altura deseada a un contorno, ya sea que esté abierto o cerrado. También existe la extrucción de corte que permite quitar material.

F

- **Fuerza:** Magnitud física que se representa mediante vectores. Se denomina fuerza a cualquier causa (acción, esfuerzo o influencia) que puede alterar el estado de movimiento o de reposo de cualquier cuerpo o bien deformarlo.
- **Fluencia:** También conocida como flujo frío, es la deformación permanente que aumenta con el tiempo bajo carga o tensión constante. Es el resultado de una exposición

prolongada a una gran tensión mecánica externa con un límite de fluencia y es más severo en materiales que se someten a calor durante mucho tiempo.

M

- **Método de los elementos finitos:** Método numérico aproximado que puede emplearse para analizar la deformación de una pieza mecánica ante una serie de condiciones de contorno aplicadas (fuerzas externas y restricciones de movimiento).
- **Modelado 3D:** El modelado 3D consiste en utilizar software para crear una representación matemática de un objeto o forma tridimensional. El objeto creado se denomina modelo 3D y se utiliza en distintas industrias. Las industrias del cine, la televisión, los videojuegos, la arquitectura, la construcción, el desarrollo de productos, la ciencia y la medicina utilizan modelos 3D para visualizar, simular y renderizar diseños gráficos.
- **Momento:** El momento de una fuerza respecto a un punto o respecto a un eje es una medida de la tendencia de la fuerza a hacer girar el cuerpo alrededor del punto o del eje.

P

- **Potencia:** En física, la potencia es la cantidad de trabajo efectuado por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de potencia es el watt, igual a un joule por segundo.
- **PTR:** Son las siglas de Perfil Tubular Rectangular y, como su nombre lo indica se refiere a un material de perfil de acero que se caracteriza por ser una barra hueca, que se utiliza en la industria de la construcción para la fabricación de estructuras que no requieren un gran tamaño ni soportar gran peso.

R

- **Relaciones de Posición:** Crean relaciones geométricas entre los componentes de un ensamblaje. A medida que se agregan las relaciones de posición, se definen las direcciones permisibles del movimiento lineal o rotacional de los componentes.

T

- **Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo:** Proporciona criterios de falla de los componentes mecánicos hechos de un material dúctil; establece que la falla o la fluencia de un material dúctil ocurrirá cuando el esfuerzo cortante máximo del material iguale o exceda el valor del esfuerzo cortante en el punto de fluencia en la prueba de tracción uniaxial.