Diseño, Simulación y Validación de una Máquina Rectificadora Portátil para el Mantenimiento de Masas en Molinos Trituradores de la Industria del Adobe

Heiner Mateo Torres Martínez

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad de Ingeniería, Departamento Mecanica

Medellín, Colombia

2026

Diseño, Simulación y Validación de una Máquina Rectificadora Portátil para el Mantenimiento de Masas en Molinos Trituradores de la Industria del Adobe

Heiner Mateo Torres Martínez

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Tecnólogo en Mecánica Industrial

Director(a):

MSc. Julian Mora Orozco

Línea de Investigación:

Investigación hacia innovación y el desarrollo tecnológico

Grupo de Investigación:

R3

Institución Universitaria Pascual Bravo

Facultad, Ingenieria Mecánica

Ciudad, Colombia

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la tenacidad necesarias para superar cada desafío presentado durante este proceso académico y personal. A mi esposa, Jadis Camila Peláez Castaño por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por caminar a mi lado en cada momento, por brindarme fortaleza en los días más exigentes y por ser una fuente constante de motivación para continuar avanzando hacia mis objetivos. Este logro también es tuyo, porque detrás de cada esfuerzo realizado siempre estuvo tu compañía y confianza. A mi hija, Sharon Sophia Torres Peláez quien llegó a nuestras vidas mientras recorría este camino académico. Tu nacimiento se convirtió en una de las mayores bendiciones y motivaciones para seguir adelante. Aunque aún eres pequeña para comprender el significado de estas páginas, deseo que algún día veas en este trabajo el reflejo de la dedicación, la constancia y el amor con los que se construyen los sueños. Tú fuiste la razón que me impulsó a esforzarme aún más para construir un mejor futuro para nuestra familia.

Heiner Mateo Torres Martínez

Agradecimientos

A mis padres Gloria María Martínez Gómez y Horacio de Jesús Torres Mejía, quienes con su amor, sacrificio, esfuerzo y ejemplo me enseñaron el valor de la perseverancia, la responsabilidad y el trabajo honesto. Gracias por acompañarme en cada etapa de mi vida, por creer en mí incluso cuando los desafíos parecían difíciles de superar y por brindarme las bases que hicieron posible alcanzar esta meta.

A mi director y guía de trabajo de grado Julián Mora Orozco, por compartir sus conocimientos, experiencia y orientación durante el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento académico fue fundamental para transformar una idea en un proyecto sólido y culminar con éxito esta etapa de formación profesional.

A la institución Universitaria Pascual Bravo que me abrió sus puertas y me brindó los conocimientos, herramientas y oportunidades necesarias para crecer tanto en el ámbito profesional como personal. Gracias por contribuir a mi formación como tecnólogo y por permitirme desarrollar las competencias que hoy hacen posible la culminación de este importante logro.

A todos ustedes dedico este trabajo, como testimonio de gratitud por su apoyo, confianza y aporte en este camino. Este logro no es únicamente el resultado de un esfuerzo individual, sino la suma del acompañamiento, la enseñanza y el amor de quienes hicieron parte de este proceso.

Resumen

La industria del adobe y la cerámica en Colombia enfrenta retos significativos debido al desgaste abrasivo de las masas en los molinos trituradores, lo que genera defectos superficiales en el producto final y costosos tiempos de inactividad por mantenimientos correctivos. El presente proyecto propone el desarrollo de una máquina rectificadora portátil diseñada específicamente para realizar el mantenimiento de estas masas sin necesidad de desmontar los componentes del molino. La metodología integra un enfoque deductivo mediante el diseño asistido por computadora (CAD) y la validación por simulación estructural (FEA), junto con un análisis experimental para la determinación de parámetros de mecanizado. Los resultados esperados incluyen un prototipo virtual validado que garantice una precisión de ± 0.1 mm y una reducción significativa en los costos de mantenimiento y tiempos de parada de planta. Esta investigación no solo busca mejorar la eficiencia productiva de las ladrilleras locales, sino también promover la sostenibilidad mediante la recuperación de componentes industriales y la reducción de desperdicios de material.

Palabras clave – Rectificado portátil, Molinos trituradores, Mantenimiento industrial, Simulación estructural, Industria del adobe.

Abstract

The adobe and ceramic industry in Colombia faces significant challenges due to the abrasive wear of grinding masses in crushing mills, which leads to surface defects in the final product and costly downtime caused by corrective maintenance. This project proposes the development of a portable grinding machine specifically designed to perform maintenance on these grinding masses without the need to disassemble the mill components. The methodology integrates a deductive approach through computer-aided design (CAD) and validation via structural simulation (FEA), along with an experimental analysis to determine machining parameters. Expected results include a validated virtual prototype capable of ensuring a precision of ± 0.1 mm and a significant reduction in maintenance costs and plant downtime. This research not only aims to improve the productive efficiency of local brick manufacturers but also to promote sustainability through the recovery of industrial components and the reduction of material waste.

Keywords – Portable grinding, Crushing mills, Industrial maintenance, Structural simulation, Adobe industry.

Índice general

Agradecimientos II

Resumen III

Abstract IV

1. Introducción 1
- 1.1. Planteamiento del problema . . . 2
- 1.2. Contexto de la Industria del Adobe en Colombia y Latinoamérica . . . 2
  - 1.2.1. Problemática Central: Deterioro de Equipos de Molienda . . . 3
  - 1.2.2. Tipología del Deterioro Superficial . . . 3
  - 1.2.3. Consecuencias en la Calidad del Adobe . . . 3
- 1.3. Relación con Variables Técnicas y Económicas . . . 4
  - 1.3.1. Variables del Estudio . . . 4
  - 1.3.2. Datos Estadísticos que Evidencian la Problemática . . . 4
- 1.4. Relevancia del Proyecto . . . 6
  - 1.4.1. Relevancia Tecnológica . . . 6
  - 1.4.2. Relevancia Científica . . . 7
  - 1.4.3. Relevancia Práctica . . . 7
- 1.5. Síntesis del Problema . . . 8
- 1.6. Formulación del Problema . . . 8
- 1.7. Justificación . . . 9
  - 1.7.1. Justificación Social: Impacto en Comunidades Rurales y Democratización Tecnológica . . . 9
  - 1.7.2. Justificación Tecnológica: Innovación y Transferencia de Conocimiento . . . 10
  - 1.7.3. Justificación Teórica: Contribución al Conocimiento Científico . . . 11
  - 1.7.4. Justificación Ambiental . . . 12
  - 1.7.5. Conveniencia del Proyecto . . . 12
  - 1.7.6. Síntesis de la Justificación . . . 13
- 1.8. Objetivos . . . 13
  - 1.8.1. Objetivo General . . . 13
  - 1.8.2. Objetivos Específicos . . . 13

2. Marco Teórico 15
- 2.1. Contexto Operativo y Tribología . . . 15
  - 2.1.1. Bases Mecánicas del Deterioro . . . 15
  - 2.1.2. Mantenimiento Inteligente y Rectificado . . . 16
- 2.2. Principio de Funcionamiento y Exigencias Mecánicas . . . 16
- 2.3. Teoría de Contacto y Fenómenos de Desgaste . . . 17

2.3.1. Impacto de las alteraciones geométricas . . . 18
2.4. Propiedades de los aceros al carbono en aplicaciones de molienda . . . 18
2.5. Teoría del mecanizado por abrasión (rectificado) . . . 19
2.5.1. Fundamentos del esmerilado: cinemática del corte . . . 19
2.5.2. Parámetros de operación y su efecto en la rugosidad . . . 20
2.5.3. Herramientas abrasivas: selección para aceros de alta dureza . . . 21
2.6. Metrología y Calidad Superficial . . . 22
2.6.1. Tolerancias dimensionales: Importancia en equipos de trituración . . . 22
2.6.2. Rugosidad superficial (Ra): Concepto y efectos tribológicos . . . 22
2.7. Despliegue de la Función de Calidad (QFD) en el Diseño Conceptual . . . 23
2.7.1. Concepto y la Voz del Cliente . . . 23
2.7.2. La Casa de la Calidad como puente hacia el modelado . . . 23
2.8. Diseño Asistido por Computadora (CAD) . . . 24
2.8.1. Fundamentos del CAD en la ingeniería mecánica . . . 25
2.8.2. Ecosistema de software CAD y modelado paramétrico 3D . . . 25
2.8.3. Planimetría y normatividad GD&T . . . 26
2.9. Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) y Validación Digital . . . 26
2.9.1. Aplicaciones de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) . . . 26
2.9.2. Variedades de software CAE y sus diferencias fundamentales . . . 27
2.9.2.1. Software CAE integrado al CAD . . . 27
2.9.2.2. Software CAE dedicado o independiente . . . 27
2.9.3. Validación estructural y criterios de falla en maquinaria . . . 28
2.9.3.1. Criterio de rigidez (control de deflexión) . . . 28
2.9.3.2. Criterio de resistencia (esfuerzos de Von Mises) . . . 28

3. Metodología **29**
3.1. Metodología . . . 29
3.1.1. Tipo de investigación y clasificación metodológica . . . 29
3.1.2. Estrategia metodológica y métodos aplicados . . . 30
3.1.3. Fases de desarrollo del proyecto . . . 31
3.1.3.1. Fase 1: Definición de requerimientos y parámetros (Aplicación QFD) . . . 31
3.1.3.2. Fase 2: Ingeniería de detalle y modelado conceptual (CAD) . . . 31
3.1.3.3. Fase 3: Validación estructural computacional (CAE) . . . 32
3.1.3.4. Fase 4: Planimetría y documentación técnica final . . . 32

4. Análisis **34**
4.1. Análisis QFD y Enfoque de Diseño . . . 34
4.1.1. Análisis de los Requerimientos del Cliente . . . 35
4.1.2. Análisis de la Rigidez Estructural . . . 36
4.1.3. Análisis de Portabilidad . . . 36
4.1.4. Análisis de Mantenibilidad . . . 37
4.1.5. Conclusiones del Análisis y Enfoque de Diseño . . . 37
4.2. Cálculos del sistema de rectificado . . . 38
4.2.1. Datos iniciales . . . 38
4.3. Lado del eje donde está la piedra . . . 39
4.3.1. Velocidad relativa del sistema . . . 39
4.3.2. Tasa de remoción de material . . . 40
4.3.2.1. Datos . . . 40
4.3.3. Energía específica . . . 40

4.3.3.1. Dato . . . 40
4.3.4. Potencia de corte . . . 40
4.3.5. Fuerza tangencial (F_C) . . . 41
4.3.5.1. Datos . . . 41
4.3.6. Fuerza normal (F_N) . . . 41
4.4. Lado del eje donde está la polea . . . 42
4.4.1. Fuerza tensora de las correas . . . 42
4.4.1.1. Datos . . . 42
4.4.2. Fuerza flexionante sobre el eje . . . 44
4.4.2.1. Componente en X . . . 44
4.4.2.2. Componente en Y . . . 45
4.5. Validación del eje con el acelerador de diseño de ejes de Inventor . . . 45
4.6. Diseño preliminar de la máquina . . . 49
4.6.1. Ensamble del sistema de rectificado . . . 49
4.6.2. Construcción del sistema transversal . . . 52
4.6.3. Construcción del sistema longitudinal . . . 56
4.6.4. Montaje del sistema portapiedra . . . 59
4.6.5. Verificación del ensamble tridimensional . . . 61
4.7. Análisis por Elementos Finitos (FEA) del Carro Transversal . . . 62
4.7.1. Procedimiento para el análisis . . . 63
4.7.1.1. Paso 1: Preparación de la Geometría CAD (Entorno *Modeling*) . . . 63
4.7.1.2. Paso 2: Creación de los Archivos de Simulación (Módulos `.fem` y `.sim`) . . . 64
4.7.1.3. Paso 3: Definición y Asignación de Materiales (*Isotropic Materials* en `.fem`) . . . 65
4.7.1.4. Paso 4: Generación de la Malla de Elementos Finitos (*Meshing* en `.fem`) . . . 69
4.7.1.5. Paso 5: Definición de Conexiones y Contactos (*Simulation Object Container*) . . . 70
4.7.1.6. Paso 6: Configuración del Caso de Carga Estática y Restricciones (Entorno `.sim`) . . . 70
4.7.1.7. Paso 7: Ejecución del Solucionador (*Solve*) . . . 73
4.7.1.8. Paso 8: Postprocesamiento y Análisis de Resultados (*Post Processing Navigator*) . . . 73
4.7.2. Propuesta de Rediseño . . . 75
4.7.2.1. Rediseño en Altura (Modificación del Ángulo de Inclinación) . . . 75
4.7.2.2. Rediseño en Espesor (Engrosamiento del Pie Amigo) . . . 76
4.7.2.3. Actualización en el Entorno de Simulación (`.fem`) . . . 78
4.7.3. El Dilema: Rigidez vs. Peso . . . 80
4.7.3.1. Resultados del Diseño Final . . . 81
4.7.3.1.1. Análisis de Deformación y Desplazamiento (Criterio de Rigidez) . . . 81
4.7.3.1.2. Análisis de Esfuerzos de Von Mises (Criterio de Resistencia) . . . 82
4.8. Obtención del peso del ensamblaje mediante las propiedades físicas de SolidWorks 84

5. Discusión **87**

6. Conclusiones y recomendaciones **90**
6.1. Conclusiones . . . 90

6.2. Recomendaciones 92

Referencias **94**

Apéndices **96**

Índice de cuadros

4.1.1.Variables técnicas con mayor peso relativo 36
4.5.1.Resultados obtenidos mediante el acelerador de diseño de ejes de Inventor. 46
4.7.1.Propiedades mecánicas y térmicas recomendadas para una poliamida PA66 reforzada con 30 % de fibra de vidrio. 68
4.7.2.Propiedades conservadoras utilizadas para el análisis estructural. 69

Índice de figuras

2.2.1.Molino industrial de rodillos. Nota. Adaptado de imágenes de maquinaria industrial, s.f. 16
2.2.2.Tambor rotativo industrial accionado por motor eléctrico. Nota. Adaptado de imágenes de maquinaria industrial propias 17
2.5.1.Esquema del proceso de rectificado superficial. Adaptado de (Wang et al., 2024). 21
2.7.1.Matriz QFD (Despliegue de la Función de Calidad) que relaciona los requerimientos del cliente con los parámetros de diseño, incluyendo correlaciones técnicas y evaluación competitiva (benchmarking). Elaboración propia. 24

4.1.1.Casa de la Calidad desarrollada para el sistema portátil de rectificado aplicado a la industria del adobe. 35
4.4.1.Configuración geométrica entre la polea motriz y la polea conducida, mostrando el ángulo de transmisión de 12,02° utilizado para la descomposición de fuerzas en el análisis del eje y del sistema de transmisión por correas. Elaboración propia. . 44
4.5.1.Resultados de validación del eje mediante el acelerador de diseño de ejes de Autodesk Inventor Professional 2026. 47
4.5.2.Distribución del diámetro ideal calculado para el eje mediante el acelerador de diseño de ejes de Autodesk Inventor Professional 2026. 48
4.6.1.Modelo tridimensional del eje principal desarrollado en Autodesk Inventor. 49
4.6.2.Modelo tridimensional del conjunto eje–soportes con rodamientos de apoyo desarrollado mediante software CAD. 50
4.6.3.Modelo tridimensional del sistema de soporte del eje, compuesto por una placa estructural, refuerzos laterales y unidades de rodamiento tipo flange para la sujeción y alineación del eje. 51
4.6.4.Modelo tridimensional del carro principal ensamblado, compuesto por la placa base, estructura de soporte reforzada, eje de transmisión y unidades de rodamiento para el guiado y soporte del sistema. 51
4.6.5.Vista inferior del carro principal que muestra los soportes de guiado y los elementos rodantes utilizados para el desplazamiento y la estabilización del sistema sobre la estructura de soporte. 52
4.6.6.Detalle del alojamiento de la tuerca roscada integrada al carro principal, diseñada para la transmisión de movimiento mediante un tornillo de accionamiento transversal. 53
4.6.7.Modelo tridimensional del soporte base con sistema de rodamientos y placa de montaje ajustable desarrollado en SolidWorks. 54
4.6.8.Modelo tridimensional del mecanismo de ajuste lineal mediante husillo roscado y guías cilíndricas desarrollado en SolidWorks. 55
4.6.9.Modelo tridimensional del sistema de guiado lineal compuesto por ejes de deslizamiento, placas laterales de soporte y bloque móvil, desarrollado en SolidWorks. 56

4.6.10 Vista isométrica del sistema de soporte del husillo de potencia mediante chumaceras con rodamientos y placas laterales de fijación, desarrollado en SolidWorks. 57
4.6.11 Vista del carro de desplazamiento accionado por husillo de potencia, integrado con la estructura de soporte y el sistema de guiado lineal, desarrollado en SolidWorks. 58
4.6.12 Modelo tridimensional del sistema de desplazamiento lineal compuesto por husillo de potencia, barras guía y placa móvil, diseñado para garantizar el movimiento controlado y la estabilidad estructural del mecanismo. 59
4.6.13 Detalle del sistema de soporte del husillo mediante chumaceras de brida cuadrada instaladas en el carro longitudinal. Se observa el montaje de los rodamientos, el acoplamiento del eje y la integración con la placa frontal del mecanismo para garantizar la alineación y transmisión eficiente del movimiento. 60
4.6.14 Polea de transmisión de dos canales montada sobre el eje de accionamiento del sistema, utilizada para transferir potencia mediante correas y generar el movimiento del mecanismo de pulido. 60
4.6.15 Montaje de la piedra abrasiva sobre el eje portaherramienta del sistema de rectificado. 61
4.6.16 Modelo tridimensional del ensamble general del sistema de rectificado, compuesto por la estructura de soporte, motor eléctrico, sistema de transmisión por poleas y correas, husillo de avance, guías lineales y conjunto portapiedra abrasiva. El diseño integra los subsistemas de accionamiento, guiado y mecanizado para garantizar precisión y estabilidad durante la operación. 62
4.7.1. Simplificación del modelo 3D. El árbol de historial de modelado (izquierda) muestra las operaciones aplicadas: *Body (1)*, *Delete Face (2)*, *Datum Plane (3)*, *Datum Plane (4)*, *Divide Face (5)* y *Divide Face (6)*. 63
4.7.2. Configuración del entorno de simulación por elementos finitos (FEM) en Siemens NX, mediante el módulo *New FEM and Simulation*. Se establece la asociación al modelo maestro *Ensamblaje_step*, generando los archivos *Ensamblaje_step_fem2.fem Ensamblaje_step_sim2.sim*, con parte idealizada *Ensamblaje_step_fem_i.prt*. El solucionador seleccionado es *NX NASTRAN* con tipo de análisis estructural, considerando todos los cuerpos visibles del ensamblaje. 64
4.7.3. Asignación del material AISI 1 (Acero A36) a los componentes estructurales del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* muestra las propiedades mecánicas configuradas, incluyendo densidad másica de $1{,}47 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, módulo de Young, relación de Poisson y módulo cortante. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los sólidos a los que se les asigna dicho material dentro del árbol de simulación. 65
4.7.4. Asignación del material *Steel_AISI1020* al eje portapiedra del sistema de rectificado en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* presenta las propiedades mecánicas del acero AISI 1020, con densidad másica de $1{,}47 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, resaltando en amarillo las propiedades de módulo de Young y relación de Poisson como campos de entrada activos. El componente visualizado en rojo corresponde al eje al cual se le asigna el material, mientras que los rodamientos y demás elementos del ensamblaje se distinguen en azul y gris respectivamente. 66

4.7.5. Asignación del material *Steel Rolled* a los elementos de tornillería (grado 8) del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* muestra las propiedades mecánicas configuradas: módulo de Young de 206000 N/mm^2, relación de Poisson de 0,3 y módulo cortante de 80 N/mm^2. Adicionalmente, en la sección *Stress-Strain Related Properties* se definen las propiedades plásticas del material, con tipo de nonlinealidad *PLASTIC*, criterio de fluencia de Von Mises, endurecimiento isotrópico y límite elástico inicial (*LIMIT1*) de 275 N/mm^2. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los tornillos a los que se asigna dicho material dentro del ensamblaje. 67
4.7.6. Asignación del material *Composite_PA_PPG* a los cuerpos de las chumaceras de soporte en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* presenta las propiedades mecánicas del material compuesto de poliamida reforzada con polipropileno, con densidad másica de $1{,}12 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, módulo de Young de 8000 N/mm^2, relación de Poisson de 0,35 y módulo cortante de 5,0 N/mm^2. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los cuerpos de las chumaceras a los cuales se les asigna dicho material dentro del ensamblaje. 68
4.7.7. Discretización mediante malla de elementos finitos tridimensional del ensamblaje del sistema de soporte en Siemens NX. El árbol de simulación muestra las colecciones de malla generadas (*3d_mesh(1)* a *3d_mesh(13)*) para cada componente del ensamblaje, incluyendo el eje portapiedra, las chumaceras, la platina base y los elementos de tornillería. La malla tetraédrica aplicada permite capturar la geometría compleja de los componentes y garantizar la precisión en el cálculo de esfuerzos y deformaciones durante el análisis estructural. 69
4.7.8. Definición de condiciones de contacto entre componentes del ensamblaje mediante la herramienta *Mesh Mating Conditions* en Siemens NX. La ventana de configuración establece la creación automática de conectores con tipo de búsqueda *All Pairs*, distancia de búsqueda de 0,0294 mm y dirección de renombramiento activada. El árbol de simulación muestra la colección *MMC Collection* con los pares de contacto generados entre las superficies del eje, las chumaceras, la platina base y los elementos de tornillería, garantizando la correcta transferencia de cargas entre los componentes durante el análisis estructural por elementos finitos. 70
4.7.9. Aplicación de restricciones de desplazamiento (*Fixed*) sobre la superficie inferior de la platina base del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX. . . 71
4.7.10. Aplicación de carga de fuerza distribuida (*Force*) sobre la superficie del eje en la zona de contacto con la polea de transmisión, en el módulo de simulación de Siemens NX. 71
4.7.11. Aplicación de carga de fuerza (*Force*) sobre el extremo del eje en la zona de contacto con la piedra abrasiva, en el módulo de simulación de Siemens NX. . . . 72
4.7.12. Aplicación de cargas de torque sobre el eje portapiedra del sistema de rectificado en el módulo de simulación de Siemens NX. (Superior) *Torque(1)* aplicado sobre el extremo del eje correspondiente a la zona de la polea de transmisión, con magnitud de 19770 N·mm en sentido positivo. (Inferior) *Torque(2)* aplicado sobre el extremo opuesto del eje en la zona de contacto con la piedra abrasiva, con magnitud de -19770 N·mm en sentido negativo, representando el par resistente durante la operación de rectificado. En ambos casos la carga se define sobre objetos cilíndricos o circulares (*Cylindrical or Circular Objects*), visualizándose mediante vectores rojos distribuidos sobre la circunferencia de las superficies seleccionadas. 72

4.7.13 Proceso de solución del análisis estructural por elementos finitos en Siemens NX mediante el solucionador NX NASTRAN. La ventana *Solution Monitor* presenta el resumen de la solución con número de carga 1 y la gráfica de convergencia del valor residual (*Convergence Value*) en función de las iteraciones, mostrando una reducción progresiva desde 1×10^{-2} hasta 1×10^{-8}, lo que indica la correcta convergencia del modelo. La ventana *Analysis Job Monitor* confirma el estado del proceso *In Progress* para el archivo *ensamblaje_step_sim1-solution_1*, con las cargas de fuerza y torque activas visibles sobre la malla del ensamblaje. 73
4.7.14 Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,271 mm (rojo), evidenciando que los desplazamientos más críticos se concentran en los extremos del eje portapiedra, particularmente en la zona de aplicación de las cargas de la piedra abrasiva y la polea de transmisión. La platina base y las chumaceras presentan desplazamientos mínimos, confirmando la rigidez de la estructura de soporte bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado. 74
4.7.15 Distribución de esfuerzos de Von Mises (*Stress - Elemental Von-Mises*) obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de esfuerzo en N/mm^2 (MPa), con un mínimo de 0,00 MPa (azul) y un máximo de 43,25 MPa (rojo). Las concentraciones de esfuerzo más elevadas se localizan en las zonas de unión entre los refuerzos triangulares y la platina base de la chumacera, así como en los bordes de los orificios de tornillería, mientras que la mayor parte de la estructura presenta esfuerzos significativamente bajos. Los valores máximos obtenidos se encuentran por debajo del límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa), lo que confirma que el diseño opera dentro del rango elástico bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado. 75
4.7.16 Rediseño paramétrico del ángulo de inclinación del refuerzo triangular de la platina base mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración permite modificar la cara seleccionada aplicando una transformación de tipo *Angle* sobre un vector y punto de eje especificados, con un valor de 10 como ángulo de rotación. La línea naranja indica el eje de referencia sobre el cual se ejecuta la modificación geométrica del refuerzo estructural, permitiendo evaluar configuraciones alternativas de rigidización de la estructura de soporte con el fin de optimizar la distribución de esfuerzos identificada en el análisis por elementos finitos. 76
4.7.17 Modificación paramétrica del espesor del refuerzo triangular de la platina base mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración muestra una transformación de tipo *Distance* sobre la cara seleccionada, con un desplazamiento de 3,175 mm en la dirección del vector especificado, indicado mediante las flechas azules sobre la geometría. Esta modificación permite incrementar el espesor del refuerzo estructural triangular con el fin de reducir las concentraciones de esfuerzo identificadas en el análisis por elementos finitos previo, mejorando la rigidez y resistencia del soporte de la chumacera bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado. 77

4.7.18 Modificación paramétrica del espesor de la platina base de soporte de la chumacera mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración establece una transformación de tipo *Distance* sobre la cara frontal de la platina, con un desplazamiento de 2,875 mm en la dirección normal a la superficie, representado mediante las flechas azules sobre la geometría. Este incremento en el espesor de la platina base busca aumentar la rigidez del soporte y redistribuir los esfuerzos concentrados en las zonas críticas detectadas durante el análisis estructural por elementos finitos, contribuyendo a mejorar el comportamiento mecánico del ensamblaje bajo las condiciones de operación del sistema de rectificado. 78
4.7.19 Modelo de elementos finitos actualizado del ensamblaje rediseñado en Siemens NX. 79
4.7.20 Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) del ensamblaje rediseñado, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,248 mm (rojo), evidenciando una reducción del desplazamiento máximo respecto al diseño original (0,271 mm). Las deformaciones más elevadas continúan concentrándose en los extremos del eje portapiedra, mientras que la platina base y los refuerzos triangulares presentan desplazamientos considerablemente menores, confirmando que las modificaciones geométricas implementadas contribuyen a mejorar la rigidez global del ensamblaje bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado. . . 79
4.7.21 Geometría actualizada del refuerzo triangular de soporte de la chumacera tras el proceso de rediseño en Siemens NX. Las cotas paramétricas indican las dimensiones modificadas del componente: base de 100,0 mm, altura de 180,0 mm, ancho superior de $P21 = 20{,}0$ mm y ancho inferior de $P20 = 30{,}0$ mm, reflejando el incremento de espesor aplicado mediante la herramienta *Move Face*. La geometría trapezoidal resultante del refuerzo permite una mejor distribución de los esfuerzos a lo largo de su sección transversal, reduciendo las concentraciones de tensión identificadas en el análisis estructural por elementos finitos del diseño original. . . 81
4.7.22 Proceso de solución del análisis estructural por elementos finitos del ensamblaje rediseñado en Siemens NX NASTRAN. La ventana *Solution Monitor* presenta la gráfica de convergencia del valor residual (*Convergence Value*) en función del número de iteraciones, mostrando una reducción progresiva y estable desde 1×10^{-4} hasta 1×10^{-7} a lo largo de aproximadamente 1400 iteraciones, confirmando la correcta convergencia del modelo rediseñado. El árbol de simulación muestra la solución activa con el subcase de carga estática (*Subcase - Static Loads*) y las cargas de fuerza y torque aplicadas, visibles mediante los vectores rojos distribuidos sobre los extremos del eje portapiedra en el modelo de malla. 82
4.7.23 Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) del ensamblaje con rediseño final, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,163 mm (rojo). El panel *Identify* muestra los valores nodales en el punto crítico: valor máximo de $8{,}0 \times 10^{-2}$ mm, mínimo de $5{,}43 \times 10^{-3}$ mm y valor promedio de $4{,}1 \times 10^{-2}$ mm. Los resultados evidencian una reducción significativa del desplazamiento máximo respecto a los diseños anteriores (0,271 mm y 0,248 mm), concentrándose las deformaciones más elevadas en el extremo del eje correspondiente a la zona de la piedra abrasiva, mientras que la estructura de soporte permanece prácticamente rígida. 83

4.7.24 Distribución de esfuerzos de Von Mises (*Stress - Elemental Von-Mises*) del ensamblaje con rediseño final, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de esfuerzo en N/mm^2 (MPa), con un mínimo de 0,00 MPa (azul) y un máximo de 33,72 MPa (rojo), representando una reducción del esfuerzo máximo respecto al diseño original (43,25 MPa), equivalente a una mejora del 22,0 %. Las concentraciones de esfuerzo más elevadas se localizan puntualmente en las esquinas inferiores de la platina base, mientras que los refuerzos triangulares y la cara frontal de soporte presentan una distribución uniforme y de baja magnitud. Los valores máximos obtenidos se mantienen ampliamente por debajo del límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa), confirmando la integridad estructural del diseño optimizado bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado. 84
4.8.1. Asignación del material ASTM A36 Steel a uno de los componentes del ensamblaje mediante la biblioteca de materiales de SolidWorks. Esta configuración permite definir las propiedades mecánicas y la densidad necesarias para los cálculos de masa y simulación estructural. 85
4.8.2. Propiedades físicas del ensamblaje obtenidas mediante la herramienta Mass Properties de SolidWorks. 86

Capítulo 1

Introducción

La industria de la construcción con adobe y materiales cerámicos constituye un pilar fundamental de la arquitectura sostenible y del patrimonio cultural en Latinoamérica. En Colombia, esta relevancia es especialmente notable, dado que gran parte de los monumentos nacionales y de las viviendas en zonas rurales dependen de la producción de bloques de tierra compactada.

Sin embargo, la eficiencia de esta industria está intrínsecamente ligada al estado técnico de su maquinaria, específicamente de los molinos trituradores, encargados de procesar la materia prima para garantizar la cohesión y calidad del producto final.

El corazón operativo de estos molinos son las "masas" o rodillos de molienda. Debido a la naturaleza altamente abrasiva de la arcilla y los materiales pétreos, estas masas sufren un desgaste progresivo que altera su geometría cilíndrica original.

Esta pérdida de forma genera irregularidades en el triturado, lo que se traduce en defectos superficiales conocidos como "despicados" o fisuras en los ladrillos, comprometiendo su resistencia estructural y su acabado estético.

Tradicionalmente, el mantenimiento de estos componentes representa un desafío logístico y económico. Los métodos convencionales exigen el desmontaje total de las masas y su traslado a talleres especializados para ser rectificadas en tornos de gran formato. Alternativamente, se realizan intervenciones manuales con herramientas eléctricas que carecen de la precisión necesaria.

Ambos procedimientos implican tiempos de parada de planta prolongados y altos costos operativos, afectando directamente la competitividad de las ladrilleras.

Ante este panorama, el presente proyecto propone el *Diseño, Simulación y Validación de una*

Máquina Rectificadora Portátil. Esta solución busca transformar el paradigma del mantenimiento industrial en el sector, permitiendo el rectificado *in situ* con una precisión de ±0,1 mm.

A través de la integración de herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y Análisis de Elementos Finitos (FEA), se pretende desarrollar un equipo que combine rigidez estructural y portabilidad, garantizando precisión y eficiencia operativa.

Esta investigación no solo aborda un problema mecánico específico, sino que se proyecta como una innovación estratégica para la optimización de procesos, la reducción del lucro cesante derivado de paradas técnicas y el fortalecimiento de la calidad en la producción de materiales de construcción tradicionales en Colombia.

1.1. Planteamiento del problema

1.2. Contexto de la Industria del Adobe en Colombia y Latinoamérica

La construcción con adobe representa un sector fundamental dentro de la arquitectura sostenible en Latinoamérica, con presencia significativa en países como Perú, México, Colombia, Ecuador y Bolivia. En Colombia, aproximadamente 80 de los 1,133 monumentos nacionales correspondientes al período colonial fueron construidos utilizando adobe y tapia pisada (Rivera-Salcedo and M. G. B. J., 2021).

Según el Censo Nacional Agropecuario (CNA) realizado por el DANE en 2014, cerca del 49.1 % de las viviendas ocupadas en el área rural dispersa del país tienen como material predominante en sus paredes materiales tradicionales. En departamentos como Casanare, el adobe se utiliza en aproximadamente el 18 % de las viviendas rurales (Rivera-Salcedo and M. G. B. J., 2021).

El mercado global de materiales de construcción sostenible, del cual forma parte la industria del adobe, alcanzó un valor de USD 429.77 mil millones en 2024 y se proyecta que llegará a USD 1,395 mil millones para 2034, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 12.5 % (Kulkarni, 2025). Este crecimiento refleja la creciente conciencia ambiental y la demanda de materiales ecológicos que reducen la huella de carbono en la construcción (Global Market Insights, 2025).

1.2.1. Problemática Central: Deterioro de Equipos de Molienda

La fabricación de adobe de calidad depende críticamente del procesamiento adecuado de la arcilla, específicamente del estado operativo de los molinos trituradores. Estos equipos industriales están compuestos por masas de molienda —cilindros o rodillos de acero— que procesan la arcilla mediante esfuerzos de compresión y cizalladura, permitiendo obtener la granulometría requerida para la conformación del material.

Problemática Central: Deterioro de Equipos de Molienda

La fabricación de adobe de calidad depende críticamente del procesamiento adecuado de la arcilla, específicamente del estado operativo de los molinos trituradores. Estos equipos industriales están compuestos por masas de molienda (cilindros o rodillos de acero) que procesan la arcilla mediante compresión y fricción continua.

1.2.2. Tipología del Deterioro Superficial

Durante la operación normal, las superficies de contacto experimentan un deterioro progresivo que se manifiesta en:

- **Defectos Superficiales:**
  - *Despicados:* Pérdida de material por desprendimiento localizado.
  - *Hundimientos:* Deformación plástica que genera depresiones.
  - *Entallados:* Surcos o ranuras longitudinales causados por abrasión.
- **Pérdida de uniformidad:** Diferencias dimensionales entre las superficies enfrentadas de los rodillos.

1.2.3. Consecuencias en la Calidad del Adobe

Las irregularidades superficiales actúan como concentradores de tensión y reducen la resistencia a la fatiga (Zenith, 2025). En el contexto de la molienda, esto genera:

- **Pérdida de uniformidad:** Paso de partículas de gran tamaño sin procesar.
- **Contaminación:** Filtración de piedras o metales que deberían ser expulsados.
- **Inconsistencia granulométrica:** Distribución no homogénea del tamaño de partícula (Wang et al., 2024).

—

1.3. Relación con Variables Técnicas y Económicas

1.3.1. Variables del Estudio

Variable Independiente: Estado superficial de las masas de molienda, medido en términos de:

- Tolerancias dimensionales
- Rugosidad superficial
- Uniformidad entre superficies enfrentadas

Variable Dependiente: Calidad del material procesado y productividad del proceso, evaluadas mediante:

- Distribución granulométrica del material
- Presencia de contaminantes
- Uniformidad de la mezcla
- Tiempo de procesamiento
- Tasa de rechazo
- Vida útil del equipo

1.3.2. Datos Estadísticos que Evidencian la Problemática

1.3.2.1. Costos de Tiempo de Inactividad en Manufactura

Según investigaciones de la industria manufacturera, el tiempo de inactividad no planificado representa uno de los mayores costos operativos:

- Los fabricantes industriales enfrentan un promedio de **800 horas de inactividad de equipos por año**, equivalente a más de **15 horas por semana** (Brook, 2025).
- El tiempo de inactividad no planificado cuesta a los fabricantes industriales hasta **USD $50 mil millones anuales a nivel global** (Stafford, 2025).
- El costo promedio del tiempo de inactividad en manufactura alcanza aproximadamente **USD $260 000 por hora** (Immerman, 2025).

1.3.2.2. Tasas de Falla de Equipos de Molienda

Las investigaciones sobre mantenimiento de molinos industriales indican que:

- Aproximadamente el **46 % de las reparaciones mayores** de equipos se realizan como resultado de **fallas inesperadas** (Department of Building and Real Estate, PolyU, 2021).
- El fallo de equipos representa el **42 % del tiempo de inactividad no planificado en manufactura**, superando problemas de inventario, falta de operadores capacitados y error humano (United Grinding, 2020).
- Los **rodamientos, ejes y componentes de molienda** presentan tasas de falla que aumentan exponencialmente cuando operan bajo condiciones de desgaste no controlado (Laura, 2024).

1.3.2.3. Impacto de Defectos Superficiales en el Rendimiento

Diversos estudios sobre calidad de rectificado en componentes mecánicos demuestran que:

- Los defectos superficiales reducen la **vida útil a fatiga**, actuando como concentradores de tensión (Zenith, 2025; Wang et al., 2024).
- El desgaste irregular incrementa la susceptibilidad a la **corrosión**, al proporcionar vías de penetración para agentes corrosivos (Zenith, 2025).
- Las superficies con defectos de rectificado experimentan **desgaste abrasivo acelerado**, reduciendo la vida operativa hasta en **80 %** (Wang et al., 2024).
- Una rugosidad superficial inadecuada incrementa el **coeficiente de fricción**, aumentando el consumo energético y la generación de calor (Wang et al., 2024).

1.3.2.4. Estándares de Precisión en Rectificado Industrial

Las normas internacionales y la práctica industrial establecen que:

- El rectificado de precisión convencional alcanza tolerancias entre **$\pm$0.001 pulgadas ($\pm$0.025 mm)** y **$\pm$0.002 pulgadas ($\pm$0.051 mm)** (Seaborn Manufacturing, 2025).
- El rectificado de superficies puede lograr **planicidad dentro de $\pm$0.005 mm** y acabados superficiales entre **Ra 0.2 y 0.8 μm** (Richconn, 2024).

- Para aplicaciones de sellado y contacto preciso se requieren tolerancias de **±0.01 mm** con acabado superficial de **Ra 0.8 μm** (Tee, 2024).
- La norma **ISO 8785:1998** define especificaciones para imperfecciones superficiales y establece límites de aceptación (International Organization for Standardization, 1998).

1.3.2.5. Prácticas Actuales de Mantenimiento

En la industria de molinos, las prácticas recomendadas indican que:

- Se deben realizar **inspecciones rutinarias cada 2,080 horas de uso** (equivalente a un turno de 8 horas, 5 días por semana durante un año) (United Grinding, 2020).
- El **mantenimiento preventivo** puede reducir los costos entre **12 % y 18 %** en comparación con reparaciones reactivas.
- La falta de mantenimiento adecuado en componentes de molienda genera:
  - Desgaste excesivo de rodillos
  - Baja eficiencia de molienda
  - Sobrecalentamiento
  - Problemas de vibración

  (Shibang Machinery, sf).

1.4. Relevancia del Proyecto

1.4.1. Relevancia Tecnológica

Actualmente, la rectificación de masas de molinos de arcilla se realiza mediante uno de los siguientes métodos:

- **Desmontaje y envío a taller especializado:** proceso costoso que requiere el transporte de componentes pesados, genera tiempos prolongados de inactividad (días o semanas) y presenta acceso limitado a talleres con capacidad de rectificado de grandes dimensiones.
- **Rectificación manual:** proceso artesanal impreciso que no garantiza tolerancias dimensionales, produce acabados superficiales inconsistentes y depende completamente de la habilidad del operario.

En este contexto, una máquina esmeriladora portátil especializada representa una innovación tecnológica relevante, ya que:

- Permite realizar rectificación directamente en el sitio de operación, eliminando costos y tiempos asociados al transporte de componentes (Superior Plant Services, sf).
- Garantiza tolerancias de precisión cercanas a $\pm$**0.1 mm** mediante mecanismos de avance controlado (Lie, sf).
- Genera acabados superficiales uniformes y repetibles en las superficies de contacto **?**.
- Reduce el tiempo de intervención de mantenimiento de días o semanas a pocas horas (Superior Plant Services, sf).
- Democratiza el acceso a tecnología de precisión para pequeñas y medianas empresas.

1.4.2. Relevancia Científica

El proyecto contribuye al desarrollo del conocimiento científico y técnico en los siguientes aspectos:

- Caracterización de parámetros de rectificado específicos para materiales ferrosos sometidos a desgaste abrasivo causado por arcilla.
- Desarrollo de metodologías de rectificación portátil que cumplan con estándares de precisión industrial (Kulkarni, 2024).
- Validación de tolerancias dimensionales críticas para superficies de molienda utilizadas en procesos de trituración de arcilla.

1.4.3. Relevancia Práctica

El proyecto genera un impacto práctico inmediato en los procesos productivos:

- **Reducción de costos operativos:** eliminación de costos asociados al transporte, desmontaje y tiempos prolongados de inactividad (Brook, 2025).
- **Mejora en la calidad del producto:** producción de adobe con distribución granulométrica consistente y libre de contaminantes.
- **Aumento de la productividad:** reducción del tiempo de mantenimiento correctivo de días a horas.

- **Sostenibilidad económica:** extensión de la vida útil de los equipos de molienda mediante estrategias de mantenimiento preventivo más eficientes.
- **Impacto social:** acceso a tecnología de precisión para pequeños productores en zonas rurales, fortaleciendo las cadenas productivas locales asociadas a la construcción sostenible.

1.5. Síntesis del Problema

La industria de fabricación de adobe en Colombia y Latinoamérica enfrenta un problema técnico crítico: el deterioro progresivo de las superficies de molienda en equipos trituradores de arcilla compromete la calidad del material procesado y genera costos operativos elevados asociados al tiempo de inactividad y al mantenimiento correctivo.

Este problema se caracteriza por la relación directa entre el estado superficial de las masas de molienda, manifestado en defectos como despicados, hundimientos, entallados y pérdida de uniformidad y la calidad del adobe producido, reflejada en:

- Distribución granulométrica inconsistente.
- Presencia de contaminantes en el material procesado.
- Variabilidad en las propiedades mecánicas del producto final.

La ausencia de tecnología de rectificado portátil especializada obliga a los productores a elegir entre dos alternativas poco eficientes:

- Realizar mantenimiento correctivo costoso mediante desmontaje y envío a talleres especializados.
- Ejecutar rectificación artesanal imprecisa directamente en campo.

Ninguna de estas opciones garantiza resultados de calidad ni sostenibilidad económica en el largo plazo.

1.6. Formulación del Problema

Con base en la descripción y caracterización de la problemática presentada, se formula la siguiente pregunta problematizadora:

> ¿Es posible diseñar y fabricar una máquina esmeriladora portátil que permita rectificar las superficies de masas de molinos trituradores de arcilla, alcanzando

tolerancias dimensionales de ±0.1 mm y un acabado superficial uniforme, mediante la aplicación de principios de la mecánica y tecnologías de mecanizado de precisión, con el propósito de optimizar la calidad del material procesado y reducir los costos y tiempos asociados al mantenimiento correctivo en la industria de fabricación de adobe?

1.7. Justificación

El desarrollo de una máquina esmeriladora portátil especializada para el rectificado de masas de molinos trituradores de arcilla representa una contribución significativa en la intersección entre innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y desarrollo social en el sector de la construcción con adobe. Este proyecto responde a una necesidad crítica y actualmente desatendida en la industria de materiales de construcción sostenible, sector que experimenta un crecimiento global proyectado de USD 429 mil millones en 2024 a USD 1,395 mil millones para 2034, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 12.5 % (Kulkarni, 2025).

La relevancia de este proyecto se fundamenta en la necesidad de democratizar el acceso a tecnología de precisión industrial para pequeños y medianos productores de adobe, quienes actualmente enfrentan costos operativos elevados y limitaciones técnicas que comprometen tanto la calidad del producto como la viabilidad económica de sus operaciones. Según investigaciones de la industria manufacturera, el tiempo de inactividad no planificado representa hasta USD 50 mil millones anuales a nivel global, siendo el 42 % atribuible a fallas de equipos (Stafford, 2025).

En el contexto colombiano y latinoamericano, donde aproximadamente el 49.1 % de las viviendas ocupadas en el área rural dispersa emplean materiales tradicionales como el adobe (Rivera-Salcedo and M. G. B. J., 2021), la disponibilidad de tecnología de mantenimiento portátil y accesible representa un factor determinante para la sostenibilidad económica de las comunidades rurales dedicadas a esta actividad productiva.

1.7.1. Justificación Social: Impacto en Comunidades Rurales y Democratización Tecnológica

1.7.1.1. ¿Por qué desde lo social?

La industria del adobe en Colombia y Latinoamérica constituye una actividad económica fundamental para comunidades rurales vulnerables. En muchas regiones, cerca del 80 % del patrimonio arquitectónico colonial fue construido con este material (Rivera-Salcedo and M. G.

B. J., 2021).

Sin embargo, estas comunidades enfrentan desafíos estructurales relacionados con el acceso limitado a tecnología de precisión, dependencia de métodos artesanales imprecisos y costos elevados de mantenimiento especializado que requieren transporte de equipos pesados a talleres urbanos, generando tiempos de inactividad prolongados.

La literatura sobre desarrollo rural sostenible establece que el fortalecimiento de capacidades tecnológicas locales es esencial para la resiliencia comunitaria y la reducción de la pobreza (Naciones Unidas, 2021). En este contexto, el desarrollo de tecnología portátil accesible representa una estrategia efectiva de transferencia tecnológica con enfoque territorial.

1.7.1.2. ¿Para qué sirve socialmente?

1. **Generación y preservación de empleo local:** la disponibilidad de tecnología de mantenimiento permite a pequeñas empresas mantener operaciones continuas, preservando fuentes de empleo en comunidades rurales.
2. **Reducción de desigualdades tecnológicas:** el proyecto democratiza el acceso a tecnología de precisión industrial mediante equipos portátiles con costo estimado de fabricación de aproximadamente USD 6,700 (Como se estimo este costo?), comparado con máquinas industriales que superan los USD 50,000.
3. **Fortalecimiento de capacidades locales:** la documentación técnica completa facilita la apropiación tecnológica por parte de comunidades rurales.
4. **Empoderamiento de pequeños productores:** la capacidad de realizar mantenimiento preventivo con tecnología propia reduce la dependencia de proveedores externos.
5. **Preservación del conocimiento tradicional:** la tecnología moderna permite mantener prácticas constructivas ancestrales como el adobe sin sacrificar eficiencia ni calidad.

1.7.2. Justificación Tecnológica: Innovación y Transferencia de Conocimiento

1.7.2.1. ¿Por qué desde lo tecnológico?

Actualmente existe una brecha tecnológica significativa en el mantenimiento de equipos para procesamiento de arcilla. Los métodos disponibles presentan limitaciones importantes:

1. **Rectificación en taller especializado:** requiere desmontaje completo de equipos,

transporte de componentes pesados (50–200 kg) y tiempos de inactividad de 7 a 21 días.

2. **Rectificación manual:** proceso artesanal dependiente de la habilidad del operario, con desviaciones dimensionales de ±0.5 a 2.0 mm y acabados superficiales inconsistentes.

Esta ausencia de tecnología intermedia entre métodos artesanales y sistemas industriales complejos constituye una barrera para la modernización del sector.

1.7.2.2. ¿Para qué sirve tecnológicamente?

1. **Innovación en portabilidad con precisión industrial:** desarrollo de un equipo portátil con capacidad de alcanzar tolerancias de ±0.1 mm y acabados superficiales de $Ra \leq 0{,}8$ µm.
2. **Transferencia tecnológica efectiva:** documentación sistemática del proceso de diseño y validación.
3. **Desarrollo de capacidades técnicas locales:** talleres regionales podrán fabricar, mantener y reparar los equipos.
4. **Optimización de procesos industriales:** caracterización de parámetros óptimos de rectificado.
5. **Escalabilidad y replicabilidad:** la metodología puede aplicarse a otros sectores industriales rurales.

1.7.3. Justificación Teórica: Contribución al Conocimiento Científico

La literatura científica sobre rectificado de precisión se enfoca principalmente en aplicaciones de alta tecnología utilizando máquinas estacionarias de gran tamaño. Existe una escasez de investigación sobre rectificado portátil de precisión para aplicaciones industriales rurales.

1.7.3.1. ¿Para qué sirve teóricamente?

1. Caracterización de parámetros óptimos de rectificado en condiciones portátiles.
2. Validación experimental de hipótesis de diseño mecánico relacionadas con rigidez estructural.
3. Modelado de relaciones entre estado superficial de masas de molienda y calidad del material procesado.

4. Desarrollo de metodologías de validación para equipos portátiles de precisión.
5. Generación de publicaciones académicas sobre tecnología aplicada a construcción sostenible.

1.7.4. Justificación Ambiental

El adobe es uno de los materiales de construcción con menor huella de carbono: aproximadamente 22 kg de CO_2 por tonelada, comparado con 143 kg por tonelada en bloques de concreto, lo que representa una reducción cercana al 85 % (Illampa et al., 2009).

Sin embargo, la eficiencia de los procesos de producción depende del estado operativo de los equipos de molienda. Cuando estos operan con superficies deterioradas, se incrementan el consumo energético, los residuos y las tasas de rechazo de material.

1.7.4.1. ¿Para qué sirve ambientalmente?

1. Optimización de eficiencia energética en procesos de molienda.
2. Reducción de residuos industriales.
3. Extensión de la vida útil de equipos.
4. Fortalecimiento de cadenas de construcción sostenible.
5. Reducción de emisiones asociadas al transporte de equipos.
6. Promoción de principios de economía circular.
7. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

1.7.5. Conveniencia del Proyecto

El desarrollo de este proyecto es conveniente debido a varios factores:

- Crecimiento del mercado de materiales de construcción sostenible.
- Alineación con políticas públicas y compromisos climáticos internacionales.
- Disponibilidad actual de componentes mecánicos de precisión a costos accesibles.
- Ausencia de soluciones tecnológicas comerciales en este nicho.

1.7.6. Síntesis de la Justificación

¿Por qué es necesario este proyecto?

Porque existe una necesidad crítica de tecnología de mantenimiento portátil y de precisión para la industria del adobe, sector clave para el desarrollo rural y la sostenibilidad ambiental.

¿Para qué sirve este proyecto?

- **Socialmente:** fortalecer capacidades locales, generar empleo rural y reducir desigualdades tecnológicas.
- **Tecnológicamente:** desarrollar innovación en diseño mecánico portátil de precisión.
- **Teóricamente:** contribuir al conocimiento científico sobre rectificado portátil.
- **Ambientalmente:** mejorar la eficiencia energética y promover materiales de construcción de bajo carbono.

En síntesis, este proyecto constituye una aplicación de la ingeniería mecánica de precisión al desarrollo sostenible, integrando innovación tecnológica con impacto social, económico y ambiental.

1.8. Objetivos

1.8.1. Objetivo General

Estructurar el diseño mecánico de un sistema portátil de esmerilado para la recuperación geométrica de molinos trituradores de arcilla, con el fin de disminuir los costos asociados al mantenimiento correctivo en el sector de producción de adobe, mediante el análisis ingenieril y el desarrollo de un modelo tridimensional del sistema.

1.8.2. Objetivos Específicos

1. Determinar las variables de operación y las fuerzas de corte requeridas para alcanzar los niveles de precisión exigidos en la superficie de la masa de molienda, mediante el análisis matemático de las condiciones de trabajo del equipo.
2. Configurar la arquitectura mecánica de la máquina mediante el uso de software de diseño asistido por computador (CAD), generando los planos de ensamble y la documentación técnica necesaria para su construcción.

3. Evaluar el comportamiento estático del sistema diseñado para verificar que la estructura soporte los esfuerzos generados durante el proceso de rectificado sin presentar deformaciones significativas, mediante simulaciones virtuales y memorias de cálculo mecánico.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Contexto Operativo y Tribología

Los molinos trituradores en la industria del adobe y la cerámica operan bajo condiciones severas, aplastando materiales duros y abrasivos mediante procesos de compresión, corte y fricción. Este régimen de trabajo busca la reducción granulométrica y la homogeneización de la masa, pero somete a los componentes a un régimen de desgaste constante por cargas repetidas.

Desde un análisis tribológico, el deterioro se manifiesta a través de tres mecanismos fundamentales:

- **Abrasión:** Rayado de las superficies por la acción de partículas de mayor dureza.
- **Adhesión:** Transferencia de material entre superficies en contacto que genera desprendimientos.
- **Fatiga Superficial:** Generación de microgrietas debido a los ciclos de estrés mecánico.

Esta erosión progresiva no solo deforma las piezas, sino que compromete la eficiencia del molino y degrada la calidad del producto final al generar granos irregulares.

2.1.1. Bases Mecánicas del Deterioro

Para comprender la vida útil de los componentes, es importante analizar la distribución de fuerzas, la velocidad de roce y las propiedades de los materiales involucrados. Estas variables definen la severidad del contacto y son la base para proponer soluciones efectivas.

2.1.2. Mantenimiento Inteligente y Rectificado

El mantenimiento moderno debe trascender la simple reparación. Se requiere una intervención de alta precisión que minimice los tiempos de inactividad. El rectificado se presenta como la técnica ideal para recuperar la integridad de las superficies gastadas, permitiendo que las piezas recuperen sus tolerancias exactas.

En resumen, diseñar una esmeriladora portátil para esto debe partir de un análisis real del desgaste y las condiciones en los molinos. Así, la máquina no solo cumple con medidas geométricas, sino que resiste las demandas mecánicas del taller industrial.

2.2. Principio de Funcionamiento y Exigencias Mecánicas

Los molinos de rodillos (o masas) son fundamentales en la preparación de materia prima para la industria del adobe. Su función técnica es la trituración, mezcla y homogeneización de la arcilla mediante la compresión mecánica generada entre dos masas cilíndricas pesadas que rotan en sentidos opuestos.



Figura 2.2.1: Molino industrial de rodillos. Nota. Adaptado de imágenes de maquinaria industrial, s.f.

La integridad de estas superficies impacta directamente en la calidad del producto final. En este

sentido, la resistencia a la compresión del adobe depende estrictamente de una distribución granulométrica adecuada y de condiciones de plasticidad óptimas, tal como lo evidencian investigaciones sobre la caracterización de materiales térreos (Peraza Góngora, 2022). Cualquier alteración geométrica en las masas compromete esta eficiencia, permitiendo el paso de terrones que reducen la resistencia estructural del bloque cerámico.

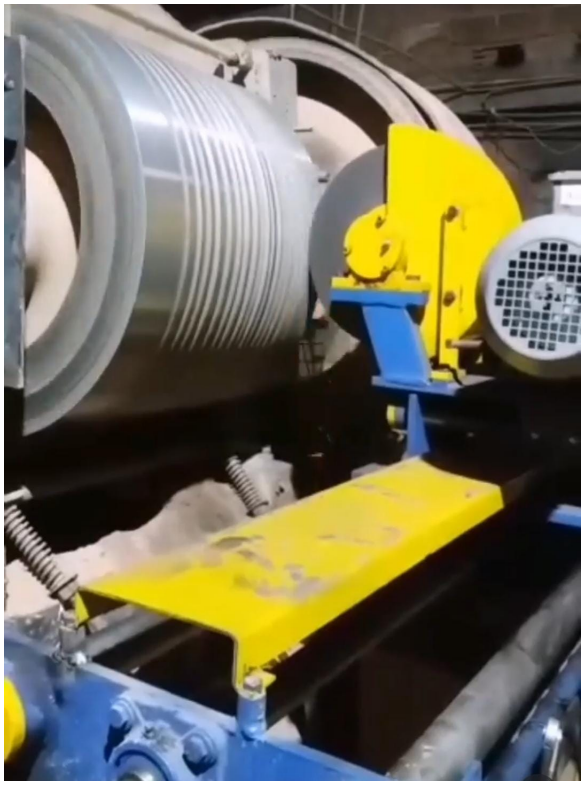


Figura 2.2.2: Tambor rotativo industrial accionado por motor eléctrico. Nota. Adaptado de imágenes de maquinaria industrial propias

2.3. Teoría de Contacto y Fenómenos de Desgaste

La interacción mecánica entre las superficies rodantes se fundamenta en la Teoría de Contacto de Hertz. Bajo este principio, el contacto entre cuerpos curvos sometidos a una carga normal genera un área de contacto finita, derivando en una distribución de presión máxima y esfuerzos subsuperficiales significativos (Ramírez Revilla, 2020).

Durante la operación, las masas experimentan un deterioro progresivo debido a:

- **Desgaste Abrasivo:** Erosión severa por la fricción con el material procesado.
- **Fatiga Superficial (Rolling Contact Fatigue):** Ciclos continuos de presión que degradan la superficie de rodadura.

2.3.1. Impacto de las alteraciones geométricas

El desgaste irregular a lo largo del rodillo, manifestado en despicados y hundimientos, constituye un aspecto crítico en el análisis mecánico del sistema, debido a tres factores fundamentales:

a) **Concentración de esfuerzos:** Los defectos superficiales actúan como concentradores de esfuerzo, incrementando localmente la presión de contacto tipo Hertz y acelerando el deterioro progresivo del equipo.

b) **Distribución irregular de presión:** La pérdida de uniformidad geométrica genera zonas de contacto preferencial y áreas sin contacto efectivo, lo que conduce a un procesamiento no homogéneo de la arcilla y a una reducción en la eficiencia del triturado.

c) **Propagación del daño:** Los esfuerzos subsuperficiales inducidos por el contacto irregular favorecen la iniciación y propagación de grietas por fatiga, lo que deriva en pérdidas abruptas de material y en la degradación acelerada de la superficie de trabajo.

Debido a estas condiciones, la rectificación geométrica es indispensable para restablecer la eficiencia operativa y prolongar la vida útil de los componentes.

2.4. Propiedades de los aceros al carbono en aplicaciones de molienda

Las masas de los molinos trituradores se fabrican típicamente en aleaciones de acero fundido o forjado, con contenidos medios o altos de carbono. Estos materiales son seleccionados por su adecuado equilibrio entre tenacidad, resistencia al desgaste y capacidad para soportar cargas de impacto.

Bajo condiciones de fricción continua en presencia de partículas abrasivas, como los silicatos presentes en la arcilla, el comportamiento mecánico de estos aceros determina los requerimientos técnicos para el diseño de la máquina esmeriladora portátil. En este contexto, se destacan los siguientes fenómenos:

a) **Endurecimiento superficial:** La acción constante de compresión y fricción genera un fenómeno de endurecimiento por acritud en la capa externa del material. Como consecuencia, la herramienta de rectificado debe ser capaz de remover esta capa endurecida, lo que implica el uso de abrasivos de alta tenacidad, como el óxido de aluminio.

b) **Respuesta térmica y microestructural:** El proceso de esmerilado produce elevadas

temperaturas debido a la fricción localizada. Si el rectificado no se realiza bajo parámetros controlados como velocidad de corte, avance y condiciones de refrigeración, el material puede sufrir quemaduras superficiales o la formación de microfisuras térmicas, comprometiendo la integridad estructural de la masa.

Estos aspectos evidencian la necesidad de controlar rigurosamente las variables del proceso de rectificado, con el fin de garantizar la integridad superficial y prolongar la vida útil de los componentes sometidos a desgaste.

2.5. Teoría del mecanizado por abrasión (rectificado)

En este apartado se abordan los principios físicos del arranque de material mediante herramientas de geometría indefinida. La comprensión de la cinemática del esmerilado resulta fundamental para justificar los parámetros de operación y las decisiones de diseño de la máquina portátil, garantizando el cumplimiento de los acabados superficiales requeridos en las masas del molino triturador.

2.5.1. Fundamentos del esmerilado: cinemática del corte

El rectificado o esmerilado es un proceso de mecanizado por abrasión a alta velocidad que utiliza una herramienta de revolución. A diferencia de procesos como el torneado o el fresado, donde la herramienta posee filos geométricamente definidos, en el rectificado intervienen miles de granos abrasivos de geometría irregular que actúan simultáneamente sobre el material.

El mecanismo de remoción de material puede describirse a través de tres etapas fundamentales de interacción entre el grano abrasivo y el acero al carbono:

a) **Fricción:** El grano entra en contacto con la superficie generando deformación elástica y calor, sin producir arranque de material.

b) **Arado (deformación plástica):** El grano penetra superficialmente, desplazando el material hacia los lados y formando surcos.

c) **Corte:** Se supera el límite de fluencia del material, produciendo la formación y desprendimiento de microvirutas, lo que da lugar a la superficie rectificada.

Para lograr tolerancias estrechas (inferiores a $\pm 0{,}1$ mm) y acabados superficiales de alta calidad, el diseño de la máquina debe garantizar una adecuada rigidez estructural que permita soportar

las fuerzas de microcorte y minimizar las vibraciones, ya que estas afectan directamente tanto la precisión como la calidad superficial (Universidad de Córdoba, 2020).

2.5.2. Parámetros de operación y su efecto en la rugosidad

El desempeño del proceso de rectificado depende de la adecuada selección y control de las variables cinemáticas. Para alcanzar una rugosidad superficial del orden de $Ra \leq 0{,}8\,\mu m$, es necesario considerar los siguientes parámetros:

- **Velocidad periférica de la muela (V_s):** Corresponde a la velocidad tangencial de los granos abrasivos en la periferia de la muela. En operaciones de rectificado, típicamente se emplean valores en el rango de 25 a 35 m/s. Este parámetro influye directamente en la calidad del acabado superficial y en la generación de calor durante el proceso; velocidades elevadas tienden a mejorar el acabado, pero incrementan el riesgo de daño térmico en la pieza.
- **Velocidad de avance (V_a):** Representa la velocidad relativa entre la muela y la pieza de trabajo. En procesos de acabado, se utilizan avances bajos con el fin de reducir la rugosidad superficial, ya que disminuyen la altura de las irregularidades generadas por los granos abrasivos. Sin embargo, avances excesivamente bajos pueden afectar la productividad del proceso.
- **Profundidad de corte (a_p):** En el rectificado, la profundidad de pasada es muy pequeña, generalmente en el rango de 0,002 a 0,05 mm. Este parámetro es crítico, ya que controla la tasa de remoción de material y las fuerzas generadas. Profundidades bajas son necesarias para garantizar alta precisión dimensional y evitar vibraciones, sobrecalentamiento y posibles daños en la superficie de la pieza. (El-Hofy, 2014)



Figura 2.5.1: Esquema del proceso de rectificado superficial. Adaptado de (Wang et al., 2024).

2.5.3. Herramientas abrasivas: selección para aceros de alta dureza

La muela esmeriladora es un material compuesto constituido por tres elementos principales: el grano abrasivo, el aglomerante y los poros. Cada uno cumple una función específica en el proceso de rectificado.

Para el mecanizado de masas de acero al carbono con endurecimiento superficial, la selección de la herramienta debe cumplir los siguientes criterios:

- **Tipo de abrasivo:** El óxido de aluminio (Al_2O_3) es el material más utilizado para el rectificado de aceros. Su elevada tenacidad permite un comportamiento de autoafilado, donde los granos se microfracturan de forma controlada, exponiendo continuamente nuevas aristas de corte (Norton Abrasives, sf).
- **Tamaño de grano y grado:** Para alcanzar acabados finos ($Ra \leq 0{,}8\,\mu m$), se requiere una granulometría fina. Además, en materiales duros se recomiendan muelas de grado blando a medio, lo que facilita la liberación de granos desafilados y evita el embotamiento de la herramienta.
- **Aglomerante:** El aglomerante vitrificado es ampliamente utilizado debido a su alta rigidez y estabilidad estructural, lo que permite mantener la geometría de la muela durante la operación.

2.6. Metrología y Calidad Superficial

Los criterios de calidad geométrica y superficial son fundamentales en el diseño de la máquina esmeriladora. Dado que el proyecto se enfoca en la ingeniería de detalle y la validación virtual, estos parámetros metrológicos constituyen las metas teóricas que definen tanto las tolerancias de fabricación en los modelos CAD como los límites de deformación admisibles en los análisis estructurales (CAE).

2.6.1. Tolerancias dimensionales: Importancia en equipos de trituración

La tolerancia dimensional se define como el rango permitido de variación de una dimensión específica durante su manufactura o, en este caso, durante su recuperación geométrica mediante procesos de mantenimiento.

En el contexto de los molinos trituradores de rodillos, alcanzar una precisión de ±0,1 mm en el rectificado de las masas no corresponde a un valor arbitrario, sino a una exigencia funcional crítica. La distancia entre los cilindros rodantes, conocida como luz de malla o *gap*, determina directamente el tamaño máximo de partícula del material procesado.

Si la rectificadora no garantiza la cilindricidad a lo largo de toda la masa y se generan excentricidades superiores a 0,1 mm, el molino operará con una apertura variable. Esta condición permite el paso de terrones de mayor tamaño, lo cual afecta negativamente la calidad del producto final, disminuyendo su resistencia mecánica.

Para cumplir con esta tolerancia desde la etapa de diseño, la estructura de la esmeriladora portátil debe poseer una rigidez suficiente para que las deflexiones del eje principal, evaluadas posteriormente mediante análisis de elementos finitos, sean significativamente inferiores a ±0,1 mm bajo condiciones de carga máxima.

2.6.2. Rugosidad superficial (Ra): Concepto y efectos tribológicos

La textura de una superficie mecanizada está compuesta por irregularidades microscópicas en forma de picos y valles. El parámetro Ra (rugosidad media aritmética) es el indicador más utilizado para cuantificar esta condición y se define como la media aritmética de las desviaciones absolutas del perfil de rugosidad respecto a una línea media.

El objetivo de diseño establece alcanzar un acabado superficial de $Ra \leq 0{,}8\ \mu m$ (equivalente al grado de rugosidad N6 según la norma ISO 21920-1:2021) (International Organization for

Standardization, 2021). Este nivel de acabado es fundamental para garantizar la vida útil de las masas de acero al carbono, debido a dos efectos tribológicos principales:

- **Prevención de fatiga prematura:** Bajo altas presiones de contacto tipo Hertz, las crestas de superficies con alta rugosidad ($Ra > 1{,}6\ \mu m$) actúan como concentradores de esfuerzo. Estas irregularidades tienden a fracturarse, iniciando microgrietas que evolucionan en fenómenos de *pitting*, lo que reduce significativamente la vida útil del componente.
- **Reducción de la adherencia:** Un acabado superficial fino ($Ra \leq 0{,}8\ \mu m$) disminuye la fricción estática, evitando la adhesión de material procesado sobre la superficie. Esto facilita la autolimpieza de los rodillos y mantiene la eficiencia del proceso de trituración.

2.7. Despliegue de la Función de Calidad (QFD) en el Diseño Conceptual

El diseño de maquinaria especializada no debe fundamentarse únicamente en la intuición técnica, sino que debe responder de manera estructurada a las necesidades operativas reales del sector al que está dirigido. Con el fin de garantizar esta alineación desde las etapas iniciales del proyecto, se emplea la metodología del Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés).

2.7.1. Concepto y la Voz del Cliente

El QFD es una metodología sistemática que permite traducir las necesidades, expectativas y requerimientos del usuario final conocidos como la *Voz del Cliente* en parámetros técnicos medibles y especificaciones de diseño.

Su aplicación en las fases tempranas de la ingeniería resulta crítica para la viabilidad del producto. Diversos estudios en desarrollo de productos industriales evidencian que una proporción significativa de proyectos fracasa debido a un entendimiento insuficiente de las necesidades del mercado o a una inadecuada definición en la etapa conceptual. En este sentido, el QFD reduce estos riesgos al asegurar que los esfuerzos de diseño se orienten hacia características que realmente aporten valor al usuario final.

2.7.2. La Casa de la Calidad como puente hacia el modelado

La herramienta principal del QFD es la matriz relacional conocida como la *Casa de la Calidad* (*House of Quality*). Esta matriz permite estructurar de manera lógica los requerimientos del

proyecto, estableciendo una relación directa entre los *"Qué"* (necesidades del usuario) y los *"Cómo"* (respuestas técnicas de ingeniería).

En el contexto del diseño de la esmeriladora portátil, los *"Qué"* incluyen requerimientos como alta precisión, portabilidad para trabajo en campo y bajo peso. Estos se traducen en *"Cómo"* tales como tolerancias dimensionales estrictas (por ejemplo, ±0,1 mm), restricciones en las dimensiones estructurales y selección de materiales con alta relación rigidez-peso.

De esta manera, la aplicación del QFD actúa como un documento rector dentro del proceso de diseño. Al cuantificar y priorizar las características técnicas mediante la matriz, se establecen límites y metas que guían directamente la generación de la planimetría en sistemas CAD y definen los criterios de validación en los análisis estructurales mediante herramientas CAE. (Akao, 2004)

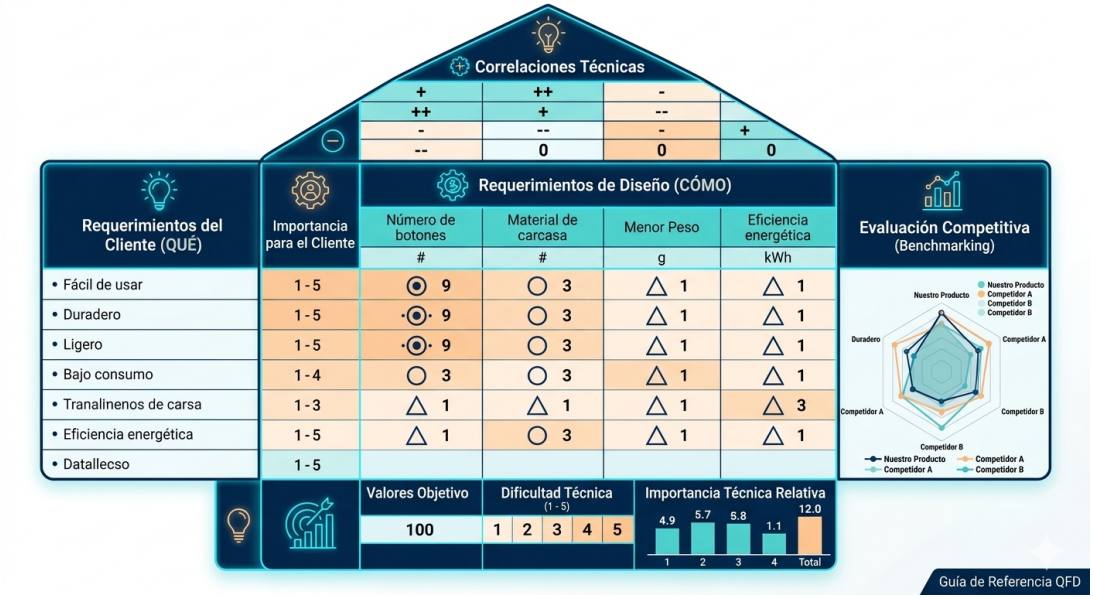


Figura 2.7.1: Matriz QFD (Despliegue de la Función de Calidad) que relaciona los requerimientos del cliente con los parámetros de diseño, incluyendo correlaciones técnicas y evaluación competitiva (benchmarking). Elaboración propia.

2.8. Diseño Asistido por Computadora (CAD)

El Diseño Asistido por Computadora (CAD) constituye la base metodológica del desarrollo digital de la máquina esmeriladora portátil. En la ingeniería mecánica contemporánea, la construcción de un gemelo digital mediante herramientas CAD representa el paso fundamental para transformar los requerimientos funcionales y los modelos matemáticos en documentación técnica precisa, necesaria para su posterior fabricación.

2.8.1. Fundamentos del CAD en la ingeniería mecánica

El CAD ha evolucionado desde su función inicial como sustituto del dibujo en tablero hacia convertirse en un entorno integral de modelado y simulación geométrica. En el desarrollo de maquinaria especializada, permite la creación de prototipos virtuales interactivos, reduciendo significativamente los costos y tiempos asociados a la iteración de prototipos físicos.

En el caso de la esmeriladora portátil, el entorno CAD facilita la evaluación de la arquitectura del ensamble, el análisis de la cinemática de los componentes móviles como el sistema de avance de la muela y la detección temprana de interferencias entre piezas. Esto permite validar criterios de portabilidad, ergonomía y funcionalidad antes de incurrir en costos de manufactura o adquisición de materiales.

2.8.2. Ecosistema de software CAD y modelado paramétrico 3D

El modelado paramétrico constituye la metodología predominante en el diseño mecánico moderno. A diferencia del modelado directo, se basa en un historial de operaciones controladas mediante restricciones geométricas y variables numéricas, lo que permite modificar el diseño de manera eficiente sin reconstruir completamente el modelo.

Dentro del ámbito de la ingeniería mecánica, existen diversas plataformas CAD que implementan este enfoque, diferenciándose por su orientación industrial, capacidades técnicas e integración con otros sistemas:

- **SolidWorks**: Considerado uno de los estándares de la industria en el diseño mecánico de gama media. Destaca por su interfaz intuitiva y su potente entorno de ensamblaje paramétrico, facilitando la generación automatizada de planos técnicos y listas de materiales (BOM) (Dassault Systèmes, 2026b).
- **Autodesk Inventor**: Presenta funcionalidades similares, con una fuerte integración con AutoCAD y herramientas especializadas para el diseño de elementos de máquinas. Incluye generadores automáticos de engranajes, ejes y rodamientos, siendo ampliamente utilizado en el diseño de maquinaria y plantas industriales (Autodesk, 2026).
- **Siemens NX y CATIA**: Corresponden a soluciones de gama alta orientadas a entornos PLM (Product Lifecycle Management). Están diseñadas para gestionar ensamblajes de gran escala y geometrías complejas, siendo ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial y automotriz. (Siemens Digital Industries Software, 2026; Dassault Systèmes, 2026a)

Para el desarrollo de la esmeriladora portátil, el uso de software de gama media como SolidWorks o Inventor resulta más adecuado, debido a su equilibrio entre capacidad técnica, facilidad de uso y enfoque específico en el diseño de sistemas mecánicos.

2.8.3. Planimetría y normatividad GD&T

El resultado final del proceso de diseño no se limita al modelo tridimensional, sino que incluye la generación de planos técnicos detallados orientados a la manufactura. Estos documentos deben cumplir con normativas internacionales que aseguren la correcta interpretación de la geometría y tolerancias de las piezas.

En este contexto, el Dimensionamiento y Tolerancia Geométrica (GD&T), fundamentado en normas como ISO 1101, proporciona un lenguaje simbólico estandarizado para definir la geometría nominal y las variaciones permisibles de los componentes (International Organization for Standardization, 2017).

En el diseño de la esmeriladora portátil, la especificación de tolerancias geométricas resulta crítica. Elementos como el eje porta-muela y las guías lineales requieren el uso de controles de cilindricidad, concentricidad y paralelismo para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Esto es especialmente relevante para alcanzar niveles de acabado superficial del orden de $Ra \leq 0{,}8\,\mu m$, exigidos en aplicaciones de rectificado de precisión.

2.9. Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) y Validación Digital

La Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) constituye la etapa final del proceso de diseño digital, en la cual se fundamenta el método científico para comprobar la viabilidad del sistema propuesto. Dado que en esta fase del proyecto no se contempla la fabricación física del equipo, el CAE se convierte en la herramienta principal para garantizar que la máquina esmeriladora portátil será capaz de soportar las cargas operativas y cumplir con las tolerancias exigidas sin presentar deformaciones críticas.

2.9.1. Aplicaciones de la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE)

El CAE abarca el uso de software computacional para simular el comportamiento de un producto bajo condiciones físicas reales. A diferencia de enfoques tradicionales, permite evaluar múltiples fenómenos físicos de manera integrada antes de la fabricación:

- **Análisis Estructural (FEA)**: Evalúa la respuesta de los componentes ante cargas estáticas y dinámicas, prediciendo deformaciones, fatiga y posibles puntos de falla. Es la herramienta principal para validar la rigidez estructural de la esmeriladora (ANSYS Inc., 2026).
- **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**: Permite simular el comportamiento de fluidos y la transferencia de calor por convección. Es útil en el diseño de sistemas de refrigeración o disipación térmica.
- **Análisis Cinemático y Dinámico (MBD)**: Estudia el movimiento de sistemas mecánicos considerando masas, inercias, aceleraciones y fuerzas de contacto a lo largo del tiempo.
- **Análisis Térmico**: Evalúa la distribución de temperatura y los esfuerzos térmicos en componentes sometidos a fuentes de calor, como la fricción generada durante el proceso de rectificado.

2.9.2. Variedades de software CAE y sus diferencias fundamentales

El núcleo matemático del análisis estructural en CAE es el Método de los Elementos Finitos (FEA), el cual discretiza el modelo en pequeños elementos para resolver numéricamente su comportamiento mecánico. En función de su implementación, el software CAE se clasifica en dos grandes categorías:

2.9.2.1. Software CAE integrado al CAD

Incluye herramientas como **SolidWorks Simulation** y **Inventor Nastran**, las cuales operan dentro del mismo entorno de modelado CAD.

Su principal ventaja radica en la integración directa con el modelo paramétrico, permitiendo modificar geometrías y ejecutar nuevas simulaciones de manera inmediata. Estas herramientas están orientadas a análisis lineales estáticos, cálculo de esfuerzos y determinación de factores de seguridad, siendo adecuadas para validaciones de diseño conceptual y de detalle (Dassault Systèmes, 2026b; Autodesk, 2026).

2.9.2.2. Software CAE dedicado o independiente

Incluye plataformas como **ANSYS**, **Abaqus** y **NASTRAN**, orientadas a simulaciones multifísicas de alta complejidad.

A diferencia de las soluciones integradas, requieren procesos más rigurosos de preparación del modelo, incluyendo mallado avanzado y definición detallada de condiciones de frontera. Su fortaleza radica en la capacidad de resolver problemas no lineales, como deformaciones plásticas, fractura de materiales o interacción multifísica avanzada (ANSYS Inc., 2026).

2.9.3. Validación estructural y criterios de falla en maquinaria

Para considerar el diseño como viable desde el punto de vista ingenieril, los resultados obtenidos mediante CAE deben cumplir criterios de aceptación basados en principios de resistencia de materiales y precisión funcional:

2.9.3.1. Criterio de rigidez (control de deflexión)

La máquina debe garantizar una tolerancia dimensional de ±0,1 mm en la pieza mecanizada. En consecuencia, al simular las fuerzas máximas de operación —incluyendo la fuerza de avance y la fuerza tangencial de corte—, el desplazamiento total en el punto crítico (eje porta-muela) debe ser inferior a 0,1 mm.

Si la deflexión supera este valor, el diseño se considera geométricamente inválido, ya que compromete la precisión del proceso de rectificado, independientemente de que el material no alcance su límite de falla.

2.9.3.2. Criterio de resistencia (esfuerzos de Von Mises)

Para componentes fabricados en materiales dúctiles, se emplea el criterio de Von Mises basado en la teoría de la energía de distorsión. La simulación debe demostrar que el esfuerzo equivalente máximo es inferior al límite de fluencia del material seleccionado.

A partir de este análisis, se define un Factor de Seguridad (FS), típicamente entre 2 y 3 para maquinaria portátil, lo cual garantiza que la estructura no experimentará deformaciones permanentes ni fallas durante su operación (Budynas and Nisbett, 2015).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología

3.1.1. Tipo de investigación y clasificación metodológica

El presente trabajo de grado se enmarca dentro de una investigación proyectiva, bajo la modalidad de proyecto factible, según lo planteado por Hurtado de Barrera (2012). Este tipo de investigación se orienta a la formulación de una propuesta o modelo tecnológico que permita dar solución a un problema práctico o satisfacer una necesidad específica dentro de un sector productivo, partiendo de un diagnóstico previamente establecido. Cabe resaltar que, en este enfoque, no es obligatoria la ejecución física o manufactura inmediata de la solución propuesta.

La elección de esta clasificación metodológica se fundamenta en las características propias del proyecto, especialmente en el contexto del diseño en mecánica industrial, las cuales se describen a continuación:

- **Enfoque tecnológico y de diseño:** El objetivo principal no es la explicación de un fenómeno teórico, sino el desarrollo de la ingeniería de detalle de una solución tangible. Esto incluye la elaboración de planimetría, definición de especificaciones técnicas y modelado tridimensional (3D) de una herramienta orientada a la industria del adobe.
- **Diseño no experimental de tipo transversal:** Dado que el proyecto se centra en un desarrollo conceptual y de detalle, no se contempla la manipulación directa de variables físicas mediante ensayos o pruebas experimentales. En su lugar, las variables geométricas y cinemáticas serán analizadas mediante herramientas computacionales,

siguiendo lo propuesto por Hernández Sampieri et al. (2014).

- **Validación virtual:** Las hipótesis de diseño, tales como el cumplimiento de tolerancias dimensionales (por ejemplo, ±0,1 mm), serán verificadas a través de entornos de simulación asistida por computadora (CAE). En este sentido, la validación empírica se sustituye por técnicas de análisis numérico, específicamente el método de análisis de elementos finitos (FEA).

3.1.2. Estrategia metodológica y métodos aplicados

La investigación integra un conjunto de métodos científicos que se aplican de manera secuencial, permitiendo estructurar el desarrollo del proyecto desde la conceptualización inicial hasta su validación en entornos digitales. Esta articulación metodológica garantiza coherencia entre los fundamentos teóricos y la solución de ingeniería propuesta.

A continuación, se describen los métodos aplicados:

- **Método deductivo (de la teoría al diseño):** El proceso de diseño se fundamenta en principios de ingeniería previamente establecidos. A partir de teorías validadas, como la teoría de contacto de Hertz y los fundamentos del desgaste por abrasión, se realiza una deducción lógica de los parámetros de diseño. Por ejemplo, a partir de las expresiones de rigidez teórica, se determinan dimensiones clave como los espesores del chasis y otros elementos estructurales.

- **Método de análisis y síntesis:** El problema de ingeniería se aborda inicialmente mediante la descomposición del sistema en subsistemas funcionales, tales como el sistema de potencia, la estructura y el sistema de avance. Posteriormente, mediante un proceso de síntesis, estos subsistemas se integran en un ensamblaje virtual, permitiendo evaluar su funcionamiento conjunto y la interacción entre sus componentes.

- **Método de simulación:** Constituye el eje central del proceso de validación. Este método sustituye la experimentación física mediante la implementación de un modelo digital, el cual es sometido a pruebas virtuales. A través de herramientas de simulación, se obtienen datos cuantitativos relacionados con esfuerzos, deformaciones y comportamiento estructural, lo que permite verificar la viabilidad del diseño desde un enfoque matemático y computacional.

3.1.3. Fases de desarrollo del proyecto

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos planteados, la metodología se estructura en cuatro fases secuenciales, integrando procesos de análisis y diseño que permiten el desarrollo progresivo de la solución de ingeniería.

3.1.3.1. Fase 1: Definición de requerimientos y parámetros (Aplicación QFD)

El proceso de diseño inicia con la identificación y traducción de las necesidades de la industria ladrillera en especificaciones técnicas cuantificables, mediante la aplicación del Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

En esta fase se construye la matriz denominada *Casa de la Calidad*, la cual permite relacionar y ponderar los requerimientos del cliente (como portabilidad y precisión de rectificado) frente a las variables de ingeniería del sistema.

A partir de este análisis, se establecen los límites de diseño y parámetros operacionales, entre los cuales se destacan:

- Peso máximo del equipo: ≤ 150 kg.
- Dimensiones generales de la envolvente.
- Parámetros operativos teóricos, como la velocidad tangencial y el avance.
- Condiciones de calidad superficial, orientadas a lograr una rugosidad de $Ra \leq 0{,}8\ \mu m$ en acero al carbono.

3.1.3.2. Fase 2: Ingeniería de detalle y modelado conceptual (CAD)

Con base en las restricciones definidas en la fase anterior, se desarrolla un modelo digital de la máquina esmeriladora mediante software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) de tipo paramétrico.

Esta fase comprende las siguientes actividades:

- **Selección virtual de componentes comerciales:** Definición técnica de elementos como motores, rodamientos, guías lineales y muelas abrasivas, apoyándose en catálogos de fabricantes e integrando sus modelos tridimensionales al ensamblaje.
- **Modelado de piezas estructurales:** Diseño tridimensional del chasis, ejes y soportes, aplicando criterios de optimización estructural que permitan reducir el peso

sin comprometer la rigidez del sistema.

- **Análisis de interferencias:** Verificación del ensamblaje en el entorno CAD para asegurar la correcta interacción entre componentes, evitando colisiones durante los movimientos cinemáticos de la máquina.

3.1.3.3. Fase 3: Validación estructural computacional (CAE)

Una vez finalizado el modelo tridimensional, se realiza la validación del diseño mediante herramientas de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE), específicamente a través del Análisis de Elementos Finitos (FEA).

Las actividades principales de esta fase son:

- **Configuración del entorno de simulación:** Asignación de propiedades mecánicas de los materiales, tales como el módulo de elasticidad y el límite de fluencia, así como la definición de condiciones de frontera, incluyendo puntos de apoyo y restricciones del sistema.
- **Aplicación de cargas:** Simulación de las fuerzas normales y tangenciales generadas durante el proceso de esmerilado, representando las condiciones reales de operación.
- **Criterios de aceptación:** El diseño se considera viable si cumple con las siguientes condiciones:
    - Los esfuerzos equivalentes de Von Mises no superan el límite de fluencia del material, garantizando un factor de seguridad adecuado.
    - La deflexión máxima en el eje de la muela es inferior a la tolerancia establecida de 0,1 mm.

3.1.3.4. Fase 4: Planimetría y documentación técnica final

Una vez validado el diseño en el entorno virtual, se procede a la generación de la documentación técnica necesaria para una posible fabricación futura (fuera del alcance del presente proyecto).

Esta fase incluye:

- Elaboración de planos de conjunto y despiece conforme a normas técnicas.

- Aplicación de dimensionamiento funcional y tolerancias geométricas (GD&T) en componentes críticos, garantizando la precisión del ensamblaje.
- Consolidación de la lista de materiales (BOM - *Bill of Materials*) y las memorias de cálculo que respaldan el diseño desarrollado.

Capítulo 4

Análisis

4.1. Análisis QFD y Enfoque de Diseño

La aplicación del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) permitió transformar las necesidades identificadas en la industria del adobe en parámetros técnicos cuantificables, facilitando la definición de criterios de diseño para el desarrollo del sistema de rectificado portátil.

La construcción de la Casa de la Calidad permitió establecer relaciones entre los requerimientos del cliente y las variables técnicas del sistema, identificando los parámetros con mayor impacto sobre el desempeño funcional, la portabilidad, la estabilidad estructural y la calidad superficial del proceso.

A partir del análisis de ponderaciones, correlaciones técnicas y evaluación competitiva, fue posible determinar las variables críticas de diseño y los principales conflictos de ingeniería presentes en el desarrollo del equipo, especialmente aquellos relacionados con la reducción de masa, la rigidez estructural y el comportamiento dinámico del sistema.

De igual manera, el análisis permitió orientar el proceso de diseño hacia un enfoque centrado en la movilidad operacional, la precisión de rectificado y la facilidad de mantenimiento, aspectos considerados prioritarios dentro de las condiciones de operación de la industria ladrillera.

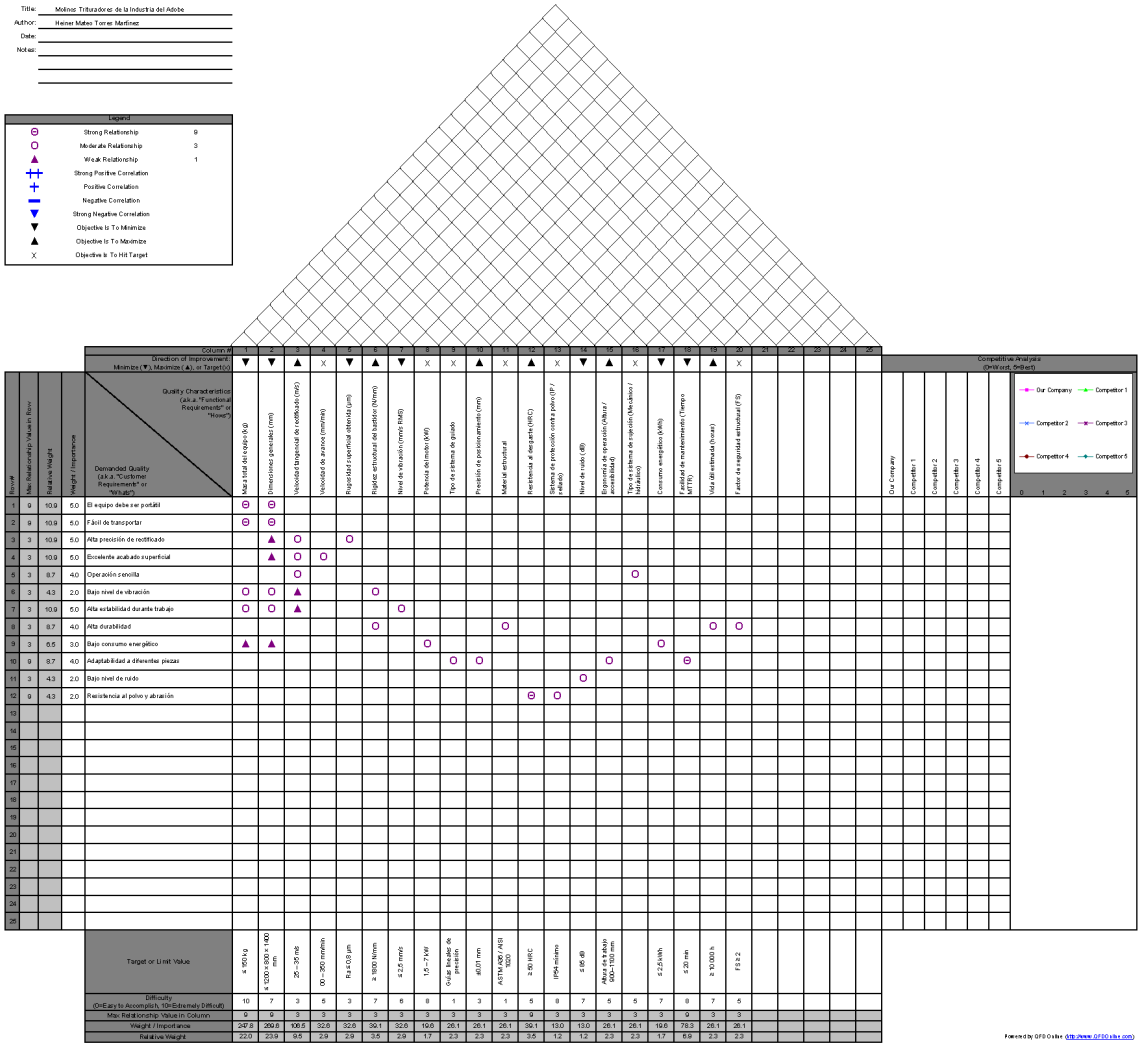


Figura 4.1.1: Casa de la Calidad desarrollada para el sistema portátil de rectificado aplicado a la industria del adobe.

Fuente: elaboración propia mediante la metodología QFD utilizando la plataforma QFD Online.

Disponible en: `https://www.qfdonline.com`

4.1.1. Análisis de los Requerimientos del Cliente

A partir de la ponderación obtenida en la matriz QFD, se determinó que las variables técnicas con mayor peso relativo fueron:

Cuadro 4.1.1: Variables técnicas con mayor peso relativo

Variable Técnica	**Peso Relativo**	**Nivel de Impacto**
Dimensiones generales	269.6	Muy alto
Masa total del equipo	247.8	Muy alto
Velocidad tangencial	106.5	Alto
Facilidad de mantenimiento	78.3	Alto
Rigidez estructural del bastidor	39.1	Alto

Los resultados indican que el desempeño del sistema está fuertemente condicionado por el comportamiento dinámico y estructural del equipo.

4.1.2. Análisis de la Rigidez Estructural

La rigidez estructural obtuvo uno de los mayores niveles de importancia técnica:

$$K \geq 1800\ N/mm$$

Esta variable resulta crítica debido a que:

- Reduce deflexiones durante el rectificado.
- Disminuye vibraciones estructurales.
- Mejora la precisión dimensional.
- Incrementa la estabilidad operacional.

En consecuencia, el diseño estructural del bastidor representa uno de los principales desafíos de ingeniería del proyecto.

4.1.3. Análisis de Portabilidad

La masa total del equipo presentó uno de los mayores pesos relativos:

$$m \leq 150\ kg$$

Este resultado evidencia la necesidad de:

- Facilitar el transporte del sistema.
- Incrementar la movilidad operativa.
- Reducir esfuerzo físico del operario.

Sin embargo, se identificó una correlación negativa entre:

- Portabilidad.
- Rigidez estructural.

Esto indica la existencia de un conflicto de diseño, ya que la reducción de masa puede disminuir la estabilidad estructural del sistema.

4.1.4. Análisis de Mantenibilidad

El parámetro de mantenibilidad definido fue:

$$MTTR \leq 20\ min$$

Este objetivo permite:

- Reducir tiempos muertos.
- Facilitar reemplazo de componentes.
- Incrementar disponibilidad operacional.

La mantenibilidad resulta especialmente importante debido al ambiente abrasivo de operación.

4.1.5. Conclusiones del Análisis y Enfoque de Diseño

Los resultados obtenidos evidencian que el diseño propuesto debe orientarse hacia el desarrollo de un sistema portátil de precisión, capaz de mantener estabilidad estructural y calidad superficial aun bajo condiciones de operación propias de la industria ladrillera.

En este sentido, las mayores fortalezas competitivas del diseño se enfocan en:

- La reducción de masa y dimensiones generales para facilitar el transporte y la movilidad operacional.

- La mejora de la calidad superficial mediante el control de vibraciones y la optimización de los parámetros de rectificado.
- El incremento de la estabilidad estructural del sistema, garantizando precisión y repetibilidad durante el proceso de trabajo.
- La incorporación de criterios de mantenibilidad que permitan reducir tiempos de intervención y mejorar la disponibilidad operacional del equipo.

Adicionalmente, el análisis del QFD permitió identificar que existe una relación crítica entre portabilidad y rigidez estructural, debido a que la disminución de masa puede afectar negativamente la estabilidad mecánica del sistema. Por esta razón, el enfoque de diseño debe centrarse en la optimización estructural del bastidor, buscando una adecuada relación rigidez-peso mediante geometrías eficientes y materiales apropiados.

4.2. Cálculos del sistema de rectificado

4.2.1. Datos iniciales

- Velocidad de la piedra (n_P):

$$1800\ RPM = 188{,}50\ rad/s$$

- Diámetro de la piedra (D_P):

$$300\ mm$$

- Ancho de piedra (F):

$$50\ mm$$

- Torque de la piedra (T_P):

$$19{,}77\ N \cdot m$$

- Torque del motor (T_M):

$$19{,}77\ N \cdot m$$

- Potencia del motor de $5HP$ (P_M):

$$3{,}73\ kW$$

- Velocidad del motor (n_M):

$$1800\ RPM$$

- Velocidad de la masa (n_{MA}):

$$500\ RPM = 52{,}36\ rad/s$$

- Diámetro de la masa (D_M):

$$1000\ mm$$

- Velocidad de avance (V_A):

$$65\ mm/min$$

- Profundidad de corte (A_p):

$$0{,}1\ mm$$

4.3. Lado del eje donde está la piedra

4.3.1. Velocidad relativa del sistema

$$V_R = V_P - V_{MA}$$

$$V_R = 1800\ RPM - 500\ RPM$$

$$V_R = 1300\ RPM$$

4.3.2. Tasa de remoción de material

4.3.2.1. Datos

- Ancho de la piedra:

$$50\ mm$$

- Profundidad de corte:

$$0{,}1\ mm$$

- Velocidad de avance:

$$65\ mm/min$$

La tasa de remoción de material se calcula mediante:

$$MRR = F \cdot A_p \cdot V$$

$$MRR = 50\ mm \times 0{,}1\ mm \times 65\ \frac{mm}{min}$$

$$MRR = 325\ \frac{mm^3}{min}$$

4.3.3. Energía específica

4.3.3.1. Dato

$$u = 50\ \frac{W \cdot s}{mm^3}$$

4.3.4. Potencia de corte

La potencia de corte se calcula mediante:

$$P = u \cdot MRR$$

$$P = 50\ \frac{W \cdot s}{mm^3} \times 325\ \frac{mm^3}{min} \times \frac{1\ min}{60\ s}$$

$$P = 270{,}83\ W$$

4.3.5. Fuerza tangencial (F_C)

4.3.5.1. Datos

- Torque de la piedra:

$$T = 19{,}77\ N \cdot m$$

- Diámetro de la piedra:

$$D = 300\ mm = 0{,}3\ m$$

El torque se define como:

$$T = F_C \left(\frac{D}{2}\right)$$

Despejando:

$$F_C = \frac{T}{(D/2)}$$

$$F_C = \frac{19{,}77\ N \cdot m}{(0{,}3/2)}$$

$$F_C = 131{,}80\ N$$

4.3.6. Fuerza normal (F_N)

La fuerza normal se estima como:

$$F_N = 1{,}3 F_C$$

$$F_N = 1{,}3(131{,}8)$$

$$F_N = 171{,}34\ N$$

4.4. Lado del eje donde está la polea

4.4.1. Fuerza tensora de las correas

4.4.1.1. Datos

- Torque del motor:

$$19{,}77\ N \cdot m$$

- Relación de transmisión:

$$1:1$$

- Diámetro de polea:

$$76{,}20\ mm = 0{,}0762\ m$$

- Radio:

$$38{,}1\ mm = 0{,}0381\ m$$

- Relación estándar industrial:

$$\frac{T_1}{T_2} = 5$$

  donde:

  - T_1: lado tenso
  - T_2: lado flojo

El torque transmitido se define como:

$$T = (T_1 - T_2)(R)$$

Sustituyendo:

$$19{,}77 = (T_1 - T_2)(0{,}0381)$$

$$\frac{19{,}77}{0{,}0381} = T_1 - T_2$$

$$518{,}90 = T_1 - T_2$$

Usando la relación:

$$T_1 = 5T_2$$

Entonces:

$$5T_2 - T_2 = 518{,}90$$

$$4T_2 = 518{,}90$$

$$T_2 = \frac{518{,}90}{4}$$

$$T_2 = 129{,}73\ N$$

Sustituyendo:

$$T_1 = 5(129{,}73)$$

$$T_1 = 648{,}65\ N$$

4.4.2. Fuerza flexionante sobre el eje

La fuerza flexionante se calcula mediante:

$$F_N = \frac{1{,}5T}{(D/2)}$$

$$F_N = \frac{1{,}5(19{,}77\ N \cdot m)}{(0{,}0762/2)}$$

$$F_N = 778{,}35\ N$$

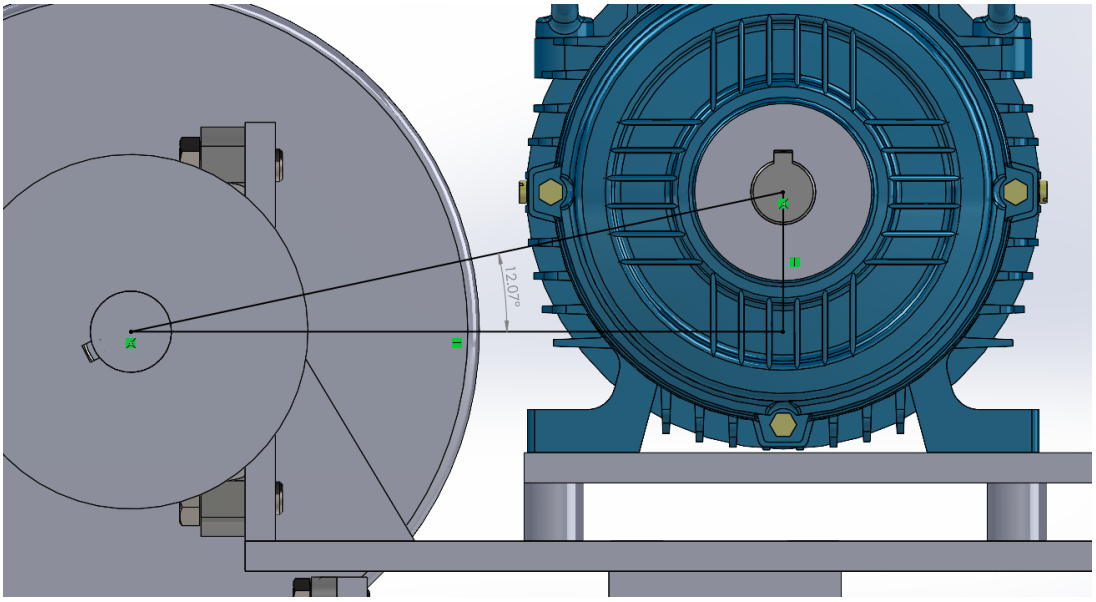


Figura 4.4.1: Configuración geométrica entre la polea motriz y la polea conducida, mostrando el ángulo de transmisión de 12,02° utilizado para la descomposición de fuerzas en el análisis del eje y del sistema de transmisión por correas. Elaboración propia.

La fuerza flexionante sobre el eje se descompone en sus componentes en los ejes X y Y considerando un ángulo de 12°.

4.4.2.1. Componente en X

$$F_{Nx} = F_N \cos(12^\circ)$$

$$F_{Nx} = 778{,}35 \cos(12^\circ)$$

$$F_{Nx} = 761{,}34\ N$$

4.4.2.2. Componente en Y

$$F_{Ny} = F_N \sin(12^\circ)$$

$$F_{Ny} = 778{,}35 \sin(12^\circ)$$

$$F_{Ny} = 161{,}82\ N$$

4.5. Validación del eje con el acelerador de diseño de ejes de Inventor

Una vez definido el diseño geométrico del eje mediante los cálculos teóricos de resistencia mecánica, se realizó su validación utilizando el módulo *Shaft Component Generator* de Autodesk Inventor Professional 2026. Esta herramienta permitió verificar el comportamiento estructural del componente bajo las condiciones reales de funcionamiento, considerando simultáneamente los efectos de flexión y torsión generados por las cargas aplicadas.

Inicialmente, se modeló el eje a partir de las dimensiones restrictivas del tamano del agujero de la piedra y la polea. El modelo fue construido mediante diferentes secciones cilíndricas escalonadas, incorporando los cambios de diámetro requeridos para el montaje de los elementos mecánicos y el chavetero destinado a la transmisión de potencia. Posteriormente, se definieron las propiedades mecánicas del material seleccionado, correspondiente a un acero AISI1020 con módulo de elasticidad de 206 000 MPa, módulo de rigidez de 80 000 MPa y densidad de 7860 kg/m^3.

Una vez configurada la geometría, se ingresaron las condiciones de carga obtenidas

en el análisis teórico. Estas incluyeron los torques transmitidos por el sistema y las fuerzas radiales generadas por los elementos montados sobre el eje. Adicionalmente, se establecieron las restricciones correspondientes a los apoyos representados por los rodamientos, permitiendo reproducir las condiciones reales de operación.

El análisis fue ejecutado empleando el criterio de esfuerzo reducido HMH (*Huber-Mises-Hencky*), equivalente al criterio de Von Mises para materiales dúctiles. Este criterio considera la combinación de esfuerzos normales y cortantes presentes en el eje, proporcionando una estimación adecuada de la condición de falla por fluencia.

Los resultados obtenidos mediante el acelerador de diseño se resumen en la Tabla 4.5.1. Se observa que el eje presenta una longitud total de 366,5 mm y una masa aproximada de 4,14 kg. El esfuerzo de flexión máximo calculado fue de 7,93 MPa, mientras que el esfuerzo cortante máximo asociado a la torsión alcanzó un valor de 2,35 MPa. El esfuerzo equivalente de Von Mises obtenido fue de 8,45 MPa, valor considerablemente inferior al límite de fluencia del material seleccionado.

Por otra parte, el desplazamiento máximo registrado fue de apenas 15,21 μm (0,015 mm), evidenciando una elevada rigidez estructural. De igual forma, la rotación angular máxima calculada fue de 0,02°, lo que indica que el eje presenta una deformación torsional mínima bajo las condiciones de carga establecidas.

Cuadro 4.5.1: Resultados obtenidos mediante el acelerador de diseño de ejes de Inventor.

Parámetro	**Valor**
Longitud total del eje (L)	366.5 mm
Masa	4.14 kg
Esfuerzo de flexión (σ_B)	7.93 MPa
Esfuerzo cortante superficial (τ_S)	0.81 MPa
Esfuerzo cortante por torsión (τ)	2.35 MPa
Esfuerzo equivalente de Von Mises (σ_{red})	8.45 MPa
Desplazamiento máximo (f_{max})	15.21 μm
Rotación angular máxima (φ)	0.02°

Las reacciones obtenidas en los apoyos mostraron una distribución coherente con las condiciones de carga definidas durante el diseño teórico, verificando el equilibrio estático del sistema. Asimismo, las zonas de mayor concentración de esfuerzos coincidieron con los

cambios de sección y regiones de transmisión de potencia, comportamiento esperado de acuerdo con los fundamentos de resistencia de materiales.

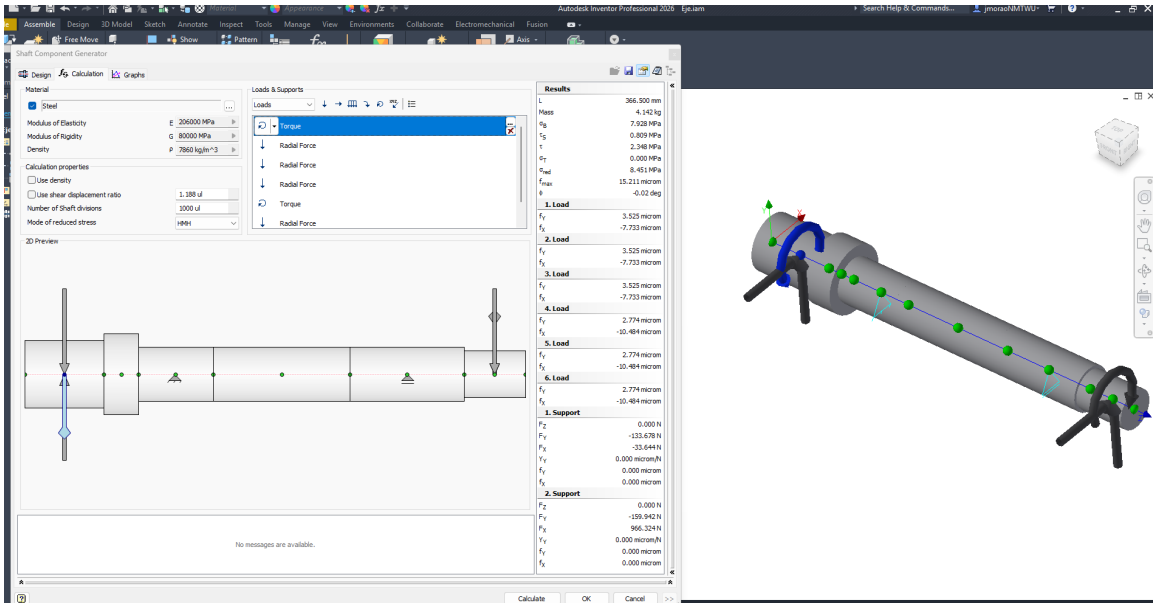


Figura 4.5.1: Resultados de validación del eje mediante el acelerador de diseño de ejes de Autodesk Inventor Professional 2026.

Fuente: elaboración propia a partir de Autodesk Inventor Professional 2026.

La Figura 4.5.2 presenta la distribución del diámetro ideal obtenida mediante el módulo de análisis del acelerador de diseño de ejes de Autodesk Inventor. Esta gráfica representa el diámetro mínimo requerido a lo largo del eje para soportar las cargas aplicadas, considerando simultáneamente los efectos de flexión y torsión bajo el criterio de falla HMH (Huber-Mises-Hencky).

Se observa que el diámetro ideal no es constante a lo largo de la geometría, sino que varía en función de la magnitud de los esfuerzos presentes en cada sección. La zona crítica se localiza aproximadamente en la región central del eje, donde se registra un diámetro ideal máximo cercano a 22 mm. Este comportamiento está asociado al incremento de los momentos flectores producidos por las fuerzas radiales transmitidas por los elementos montados sobre el eje y las reacciones generadas en los apoyos.

Al comparar los diámetros ideales calculados con los diámetros definidos en el diseño final, se evidencia que las dimensiones seleccionadas son superiores a los valores mínimos requeridos por el análisis. Esto garantiza que el eje posee una capacidad resistente adecuada para soportar las condiciones de carga establecidas, manteniendo niveles de esfuerzo inferiores a los límites admisibles del material.

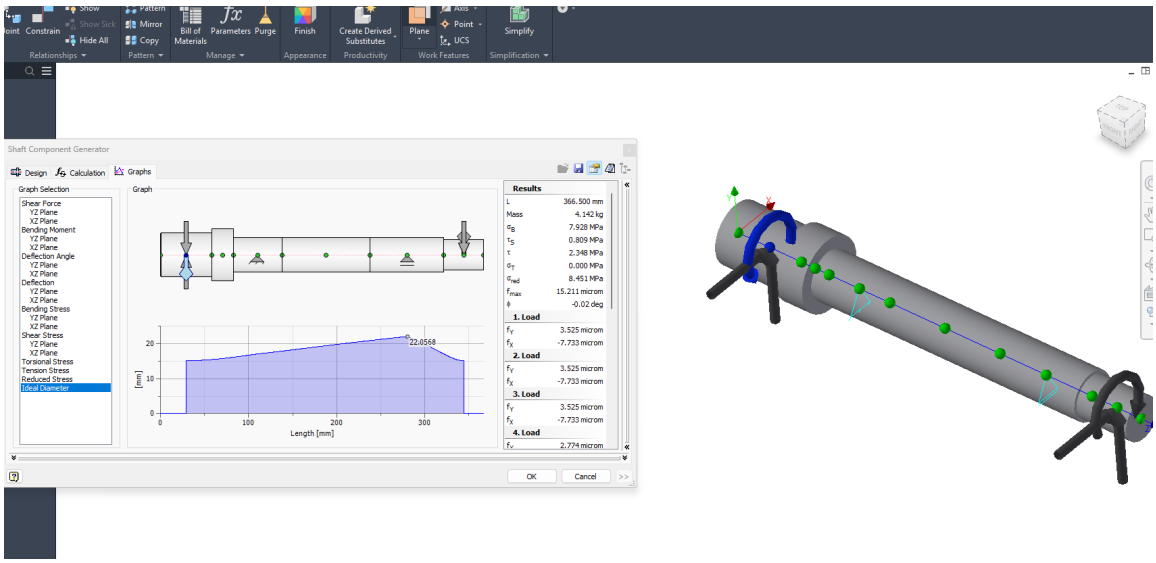


Figura 4.5.2: Distribución del diámetro ideal calculado para el eje mediante el acelerador de diseño de ejes de Autodesk Inventor Professional 2026.

Fuente: elaboración propia a partir de Autodesk Inventor Professional 2026.

Adicionalmente, la distribución obtenida permite identificar posibles oportunidades de optimización geométrica. Sin embargo, dado que los diámetros seleccionados responden también a criterios funcionales relacionados con el montaje de rodamientos, acoples, elementos de transmisión y procesos de manufactura, se concluye que la geometría propuesta ofrece un equilibrio adecuado entre resistencia mecánica, rigidez estructural y factibilidad de fabricación.

Por tanto, los resultados obtenidos mediante el acelerador de diseño validan las dimensiones adoptadas durante la etapa de diseño teórico, demostrando que el eje cumple satisfactoriamente los requisitos de resistencia y seguridad exigidos para su operación. La comparación entre los resultados analíticos y los obtenidos mediante Autodesk Inventor permitió corroborar la validez de las dimensiones seleccionadas para el eje. Los esfuerzos calculados permanecen muy por debajo de la capacidad resistente del material, mientras que las deformaciones y desplazamientos obtenidos son prácticamente despreciables para las condiciones de operación consideradas.

En consecuencia, la simulación realizada mediante el acelerador de diseño de ejes valida la propuesta desarrollada, demostrando que el componente posee la resistencia mecánica y rigidez necesarias para garantizar un funcionamiento seguro y confiable dentro del sistema de transmisión diseñado.

4.6. Diseño preliminar de la máquina

Una vez validados los principales componentes mecánicos mediante cálculos teóricos y herramientas de simulación asistida por computadora, se procedió al desarrollo del modelo tridimensional de la máquina en SolidWorks 2026. El objetivo de esta etapa fue verificar la integración geométrica de los componentes, evaluar la factibilidad de ensamble y garantizar la correcta disposición de los sistemas de transmisión, soporte y guiado antes de la fabricación.

El proceso de modelado y ensamble se desarrolló de manera secuencial siguiendo la metodología de construcción real de la máquina, iniciando con los elementos estructurales principales y posteriormente incorporando los sistemas de movimiento y rectificado.

4.6.1. Ensamble del sistema de rectificado

El proceso comenzó con la incorporación del eje principal previamente diseñado y validado. Este componente constituye el elemento fundamental del sistema de rectificado, ya que sobre él se montan los elementos encargados de transmitir el movimiento de rotación y soportar la piedra abrasiva.

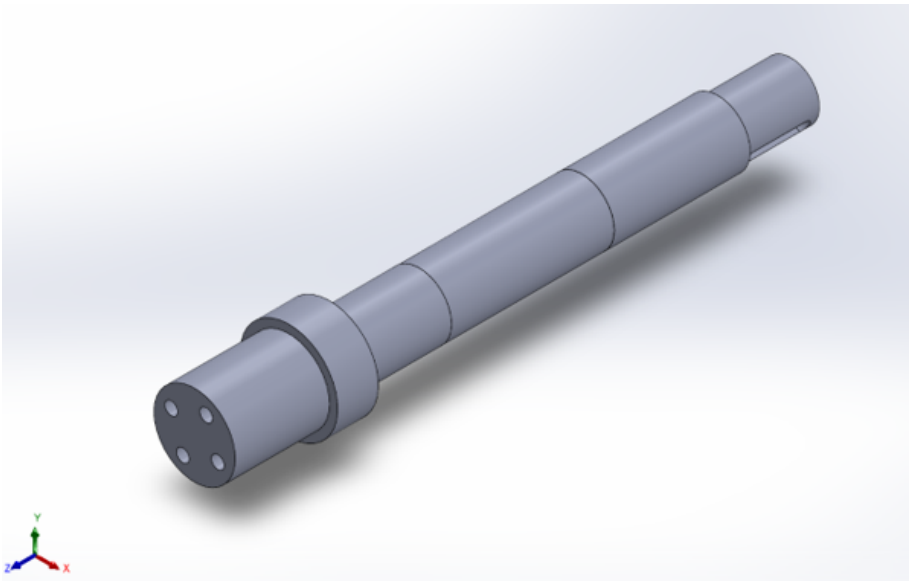


Figura 4.6.1: Modelo tridimensional del eje principal desarrollado en Autodesk Inventor.
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se ensamblaron las chumaceras SKF SYK 40 TR junto con los rodamientos YAR 208-2F, seleccionados de acuerdo con los requerimientos de velocidad de giro y

capacidad de carga axial y radial establecidos durante la fase de diseño. La incorporación de estos elementos permitió definir los puntos de apoyo del eje y garantizar su estabilidad durante el funcionamiento.

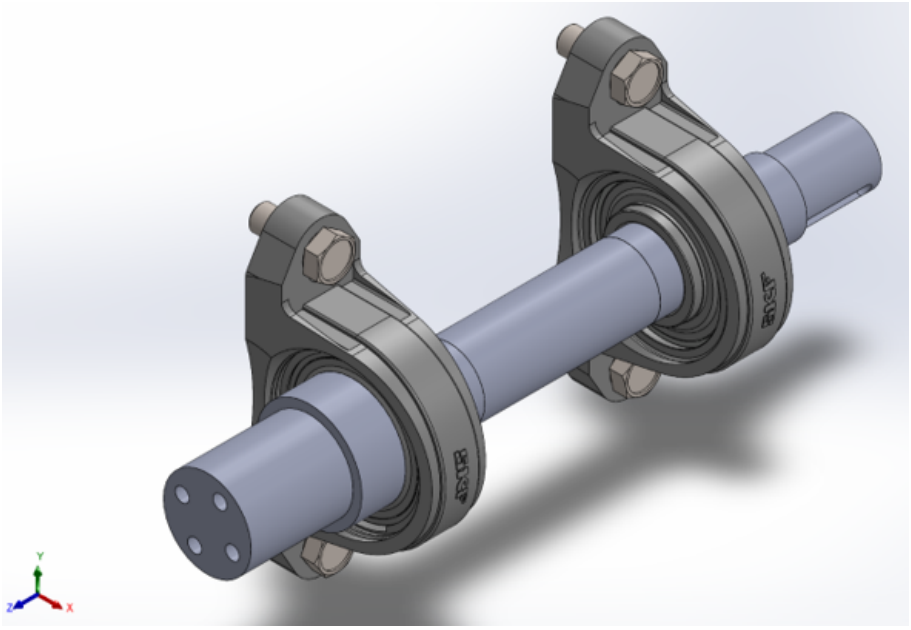


Figura 4.6.2: Modelo tridimensional del conjunto eje–soportes con rodamientos de apoyo desarrollado mediante software CAD.

Fuente: elaboración propia.

Una vez completado el subconjunto eje-rodamientos, las chumaceras fueron fijadas mediante pernos M14 sobre una platina fabricada en acero ASTM A36 de 12.7 mm de espesor. Esta platina incorpora dos soportes posteriores soldados cuya función es incrementar la rigidez estructural del conjunto y minimizar posibles deformaciones durante el proceso de rectificado.

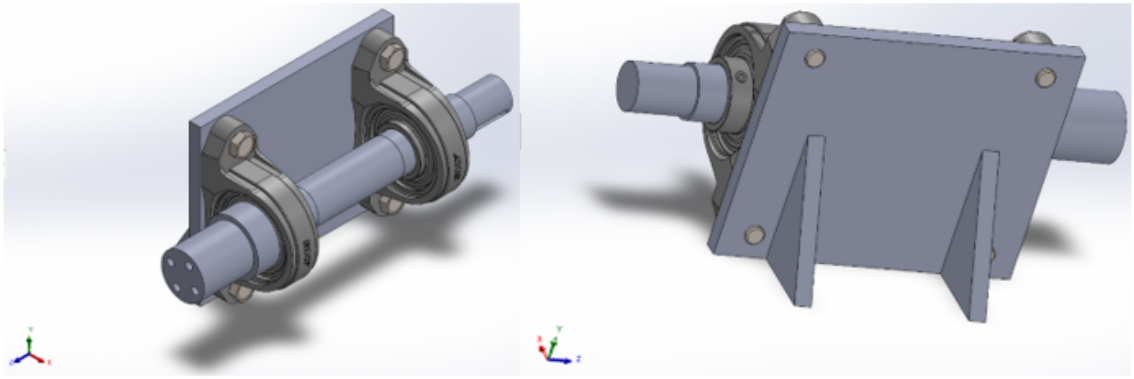


Figura 4.6.3: Modelo tridimensional del sistema de soporte del eje, compuesto por una placa estructural, refuerzos laterales y unidades de rodamiento tipo flange para la sujeción y alineación del eje.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el conjunto estructural fue integrado a una segunda platina base de acero ASTM A36 de 12.7 mm de espesor, conformando la estructura principal de soporte del sistema de rectificado.

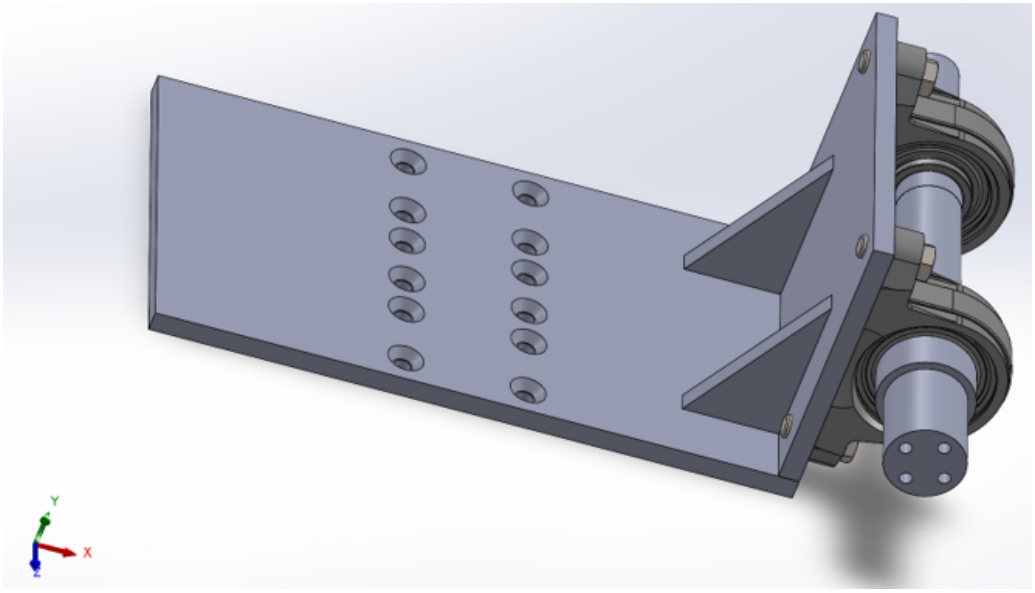


Figura 4.6.4: Modelo tridimensional del carro principal ensamblado, compuesto por la placa base, estructura de soporte reforzada, eje de transmisión y unidades de rodamiento para el guiado y soporte del sistema.

Fuente: elaboración propia.

4.6.2. Construcción del sistema transversal

Con la estructura principal definida, se procedió al modelado y ensamble del sistema transversal encargado del posicionamiento de la pieza de trabajo.

Inicialmente se ensamblaron los cuerpos de las barras transversales mediante cuatro pernos avellanados M10 para cada componente. Durante esta operación se incorporaron los respectivos bujes internos montados mediante ajuste por interferencia, garantizando la alineación y el desplazamiento controlado del sistema.

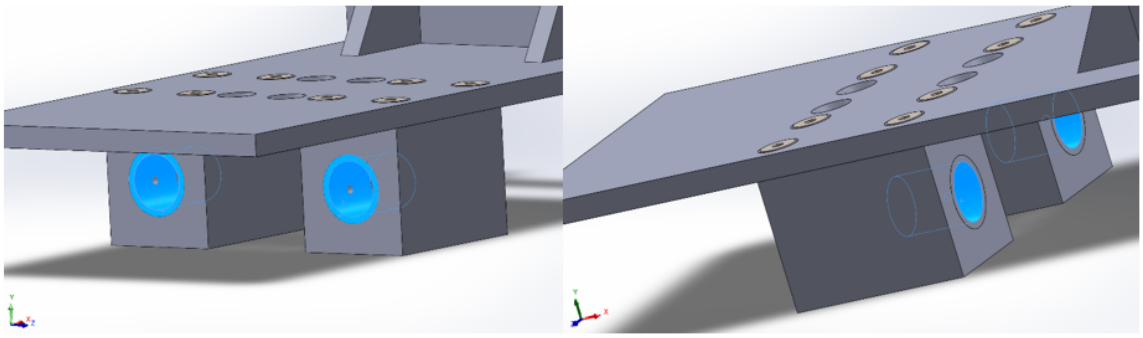


Figura 4.6.5: Vista inferior del carro principal que muestra los soportes de guiado y los elementos rodantes utilizados para el desplazamiento y la estabilización del sistema sobre la estructura de soporte.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se ensambló el cuerpo de la tuerca del tornillo transversal utilizando cuatro pernos M10. Este componente incorpora un buje roscado interno instalado a presión, encargado de transformar el movimiento rotacional del tornillo en desplazamiento lineal.

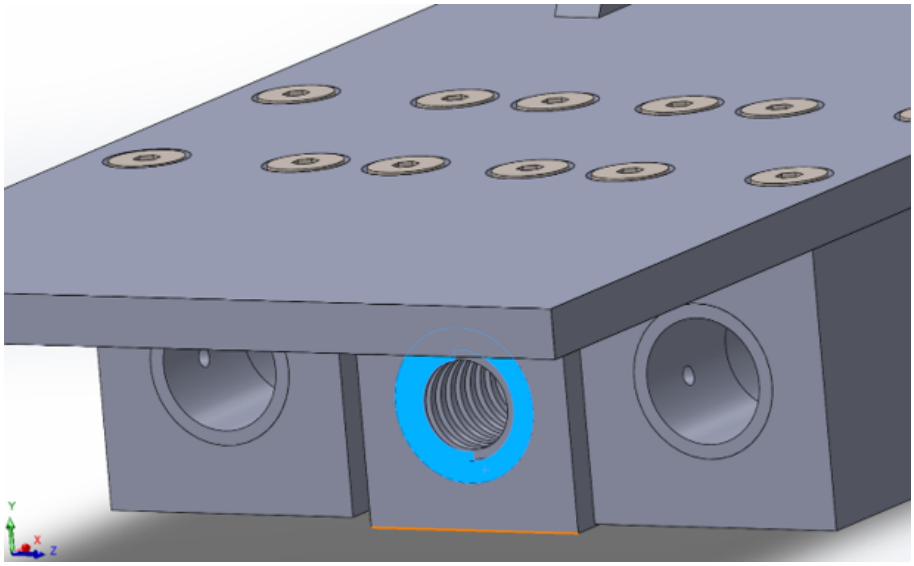


Figura 4.6.6: Detalle del alojamiento de la tuerca roscada integrada al carro principal, diseñada para la transmisión de movimiento mediante un tornillo de accionamiento transversal.

Fuente: elaboración propia.

Una vez completado este subconjunto, se adicionaron cuatro soportes roscados soldados a la estructura principal, los cuales sirven como elementos de fijación del mecanismo transversal. Sobre estos soportes se instaló una platina de acero ASTM A36 de 12.7 mm de espesor mediante cuatro pernos M10.

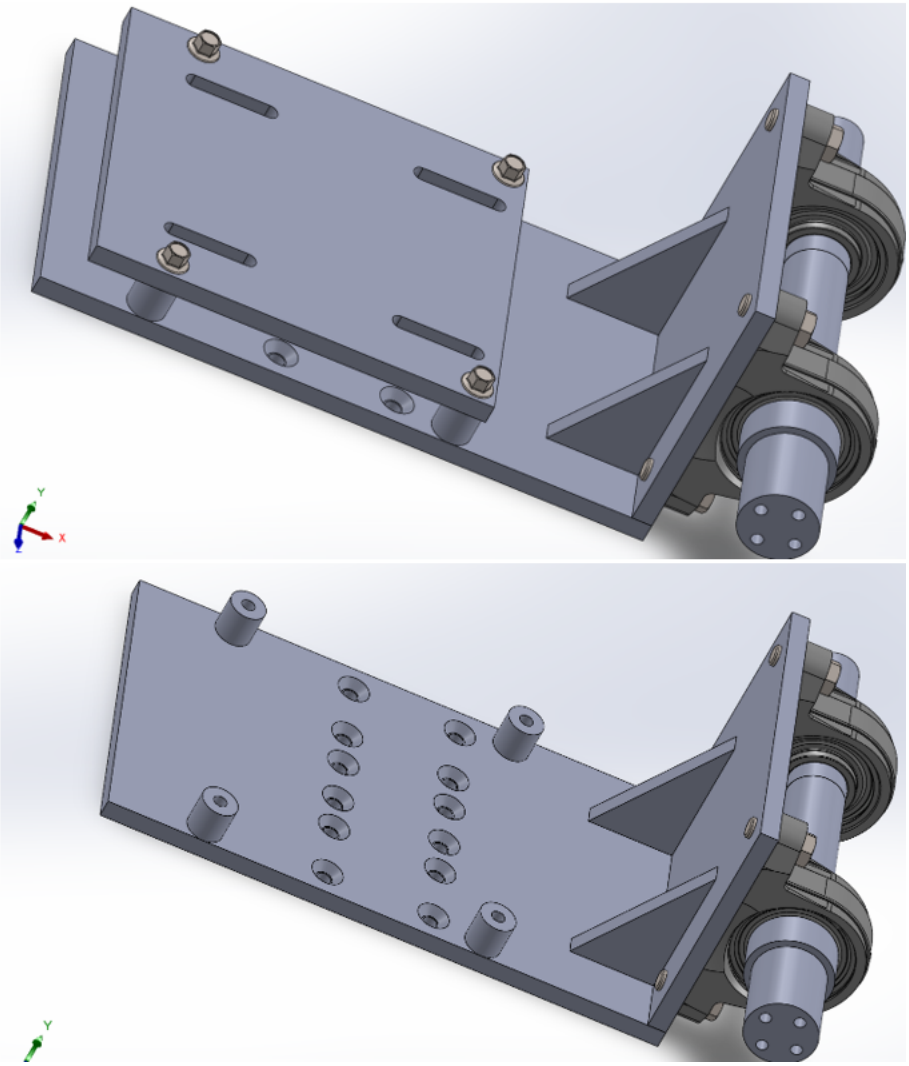


Figura 4.6.7: Modelo tridimensional del soporte base con sistema de rodamientos y placa de montaje ajustable desarrollado en SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se incorporó el tornillo transversal y se ensamblaron las barras guía y soporte, verificando las restricciones geométricas y los grados de libertad necesarios para el desplazamiento controlado del mecanismo.

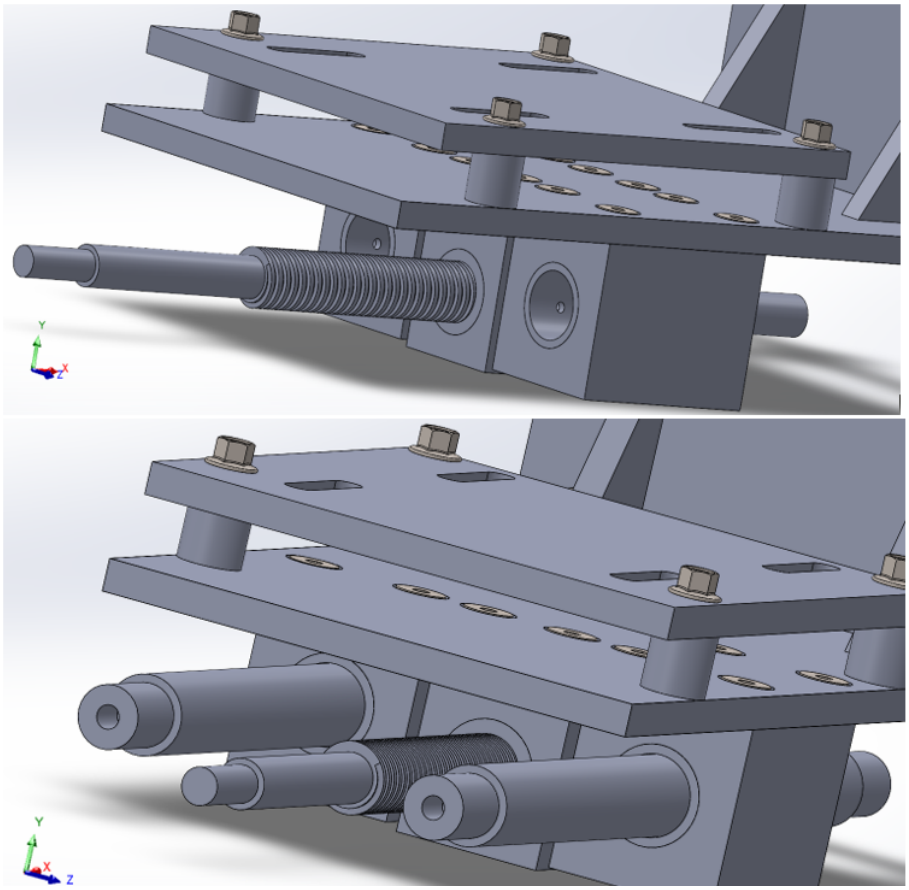


Figura 4.6.8: Modelo tridimensional del mecanismo de ajuste lineal mediante husillo roscado y guías cilíndricas desarrollado en SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente se posicionaron las platinas de soporte y se ensamblaron los bujes guía mediante ajuste a presión, completando el sistema transversal.

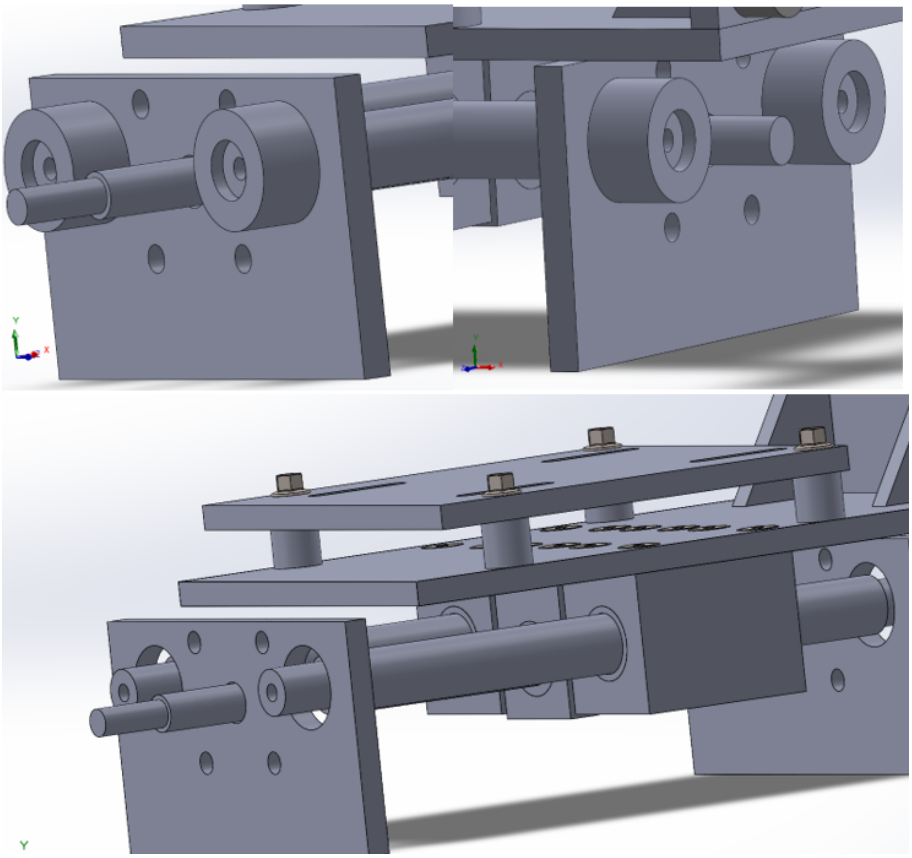


Figura 4.6.9: Modelo tridimensional del sistema de guiado lineal compuesto por ejes de deslizamiento, placas laterales de soporte y bloque móvil, desarrollado en SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Construcción del sistema longitudinal

Una vez finalizado el sistema transversal, se desarrolló el sistema longitudinal responsable del desplazamiento principal de la mesa de trabajo.

El proceso inició con la instalación de las chumaceras SKF UCF 204 H junto con los rodamientos UC 204, fijadas mediante cuatro pernos M14 cada una. Estos elementos proporcionan el soporte necesario para el eje longitudinal y garantizan una adecuada capacidad de carga durante la operación.

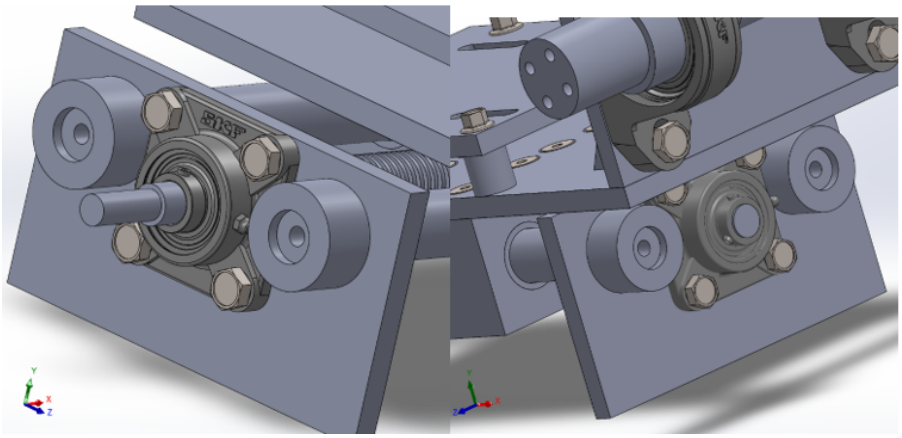


Figura 4.6.10: Vista isométrica del sistema de soporte del husillo de potencia mediante chumaceras con rodamientos y placas laterales de fijación, desarrollado en SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se incorporaron los ángulos estructurales de soporte y fijación, los cuales fueron unidos mediante soldadura al bastidor principal de la máquina.

Antes del montaje de la base longitudinal se ensamblaron los cuerpos longitudinales utilizando cuatro pernos M10 en cada componente. De igual forma, se instalaron los bujes internos mediante ajuste por interferencia para garantizar la precisión del sistema de guiado.

Una vez preparados los subconjuntos, la platina longitudinal fue fijada a los ángulos de soporte mediante ocho pernos M10. Sobre esta estructura se instaló posteriormente el cuerpo de la tuerca longitudinal utilizando cuatro pernos M12, incorporando igualmente un buje roscado ensamblado a presión.

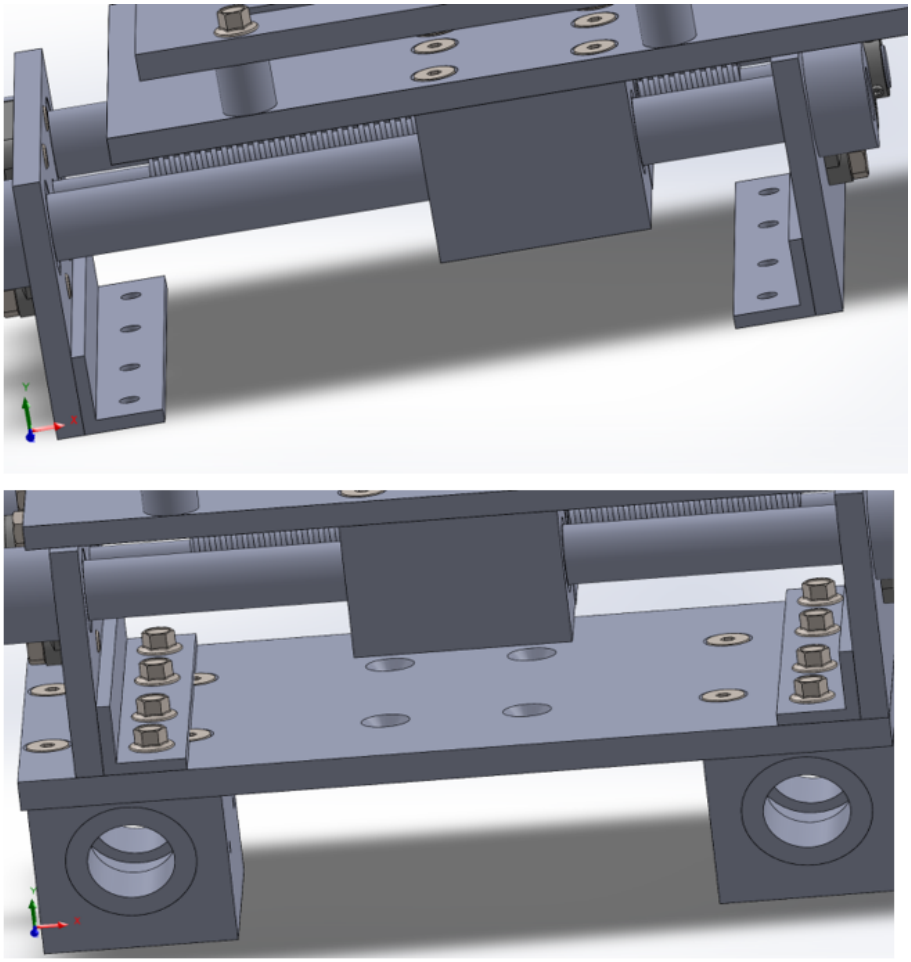


Figura 4.6.11: Vista del carro de desplazamiento accionado por husillo de potencia, integrado con la estructura de soporte y el sistema de guiado lineal, desarrollado en SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se ensamblaron las dos barras longitudinales de soporte y guía junto con el tornillo longitudinal, conformando el mecanismo principal de desplazamiento de la mesa.

Finalmente se posicionaron las láminas de soporte, las barras estabilizadoras y separadoras, completando la estructura móvil del sistema longitudinal.

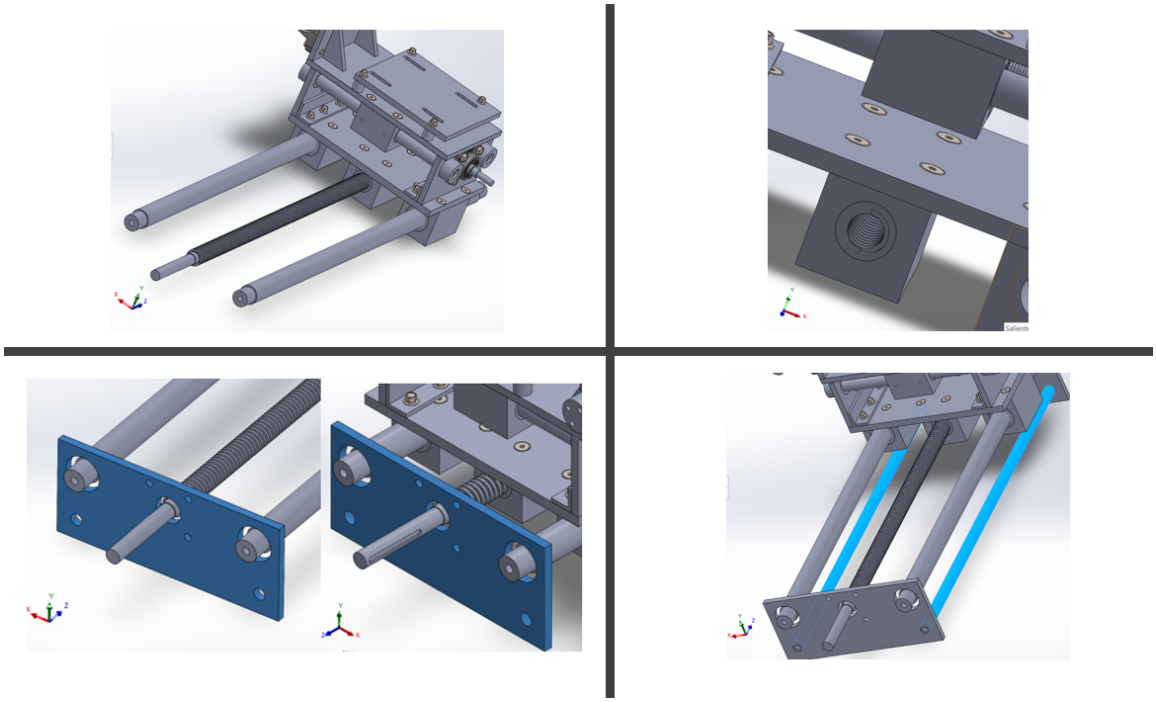


Figura 4.6.12: Modelo tridimensional del sistema de desplazamiento lineal compuesto por husillo de potencia, barras guía y placa móvil, diseñado para garantizar el movimiento controlado y la estabilidad estructural del mecanismo.

Fuente: elaboración propia.

4.6.4. Montaje del sistema portapiedra

Una vez finalizados los mecanismos de desplazamiento, se procedió al desarrollo del sistema portapiedra.

Inicialmente se ensamblaron a presión los bujes de las barras guía y posteriormente se instalaron las chumaceras SKF FY 25 FM con rodamientos YET 205 mediante cuatro pernos M12 en cada soporte. Estos componentes proporcionan el apoyo requerido para el eje encargado de soportar la piedra abrasiva.

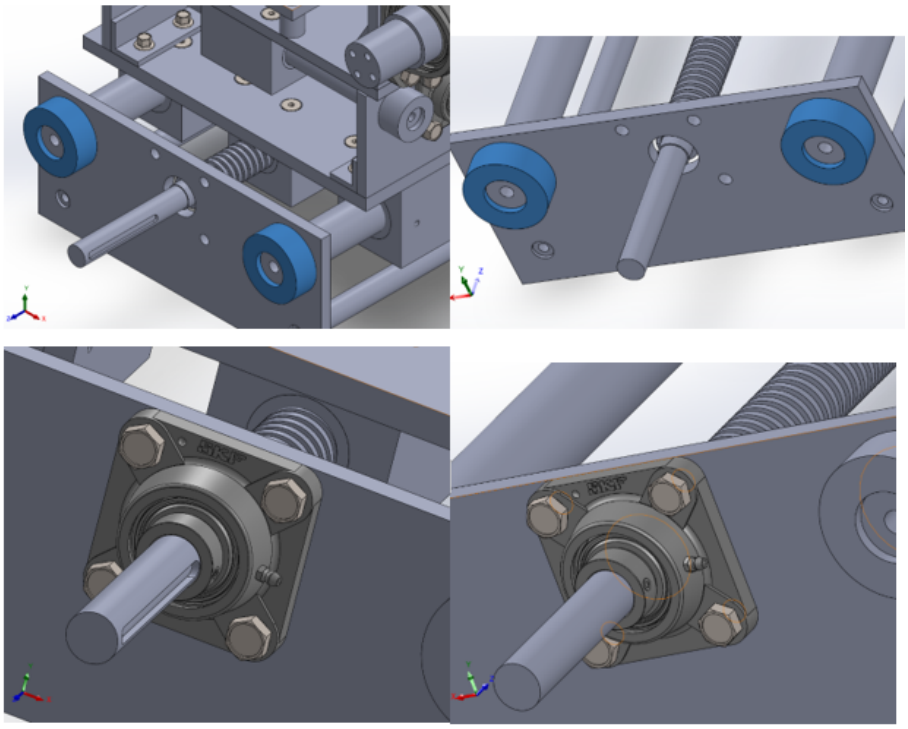


Figura 4.6.13: Detalle del sistema de soporte del husillo mediante chumaceras de brida cuadrada instaladas en el carro longitudinal. Se observa el montaje de los rodamientos, el acoplamiento del eje y la integración con la placa frontal del mecanismo para garantizar la alineación y transmisión eficiente del movimiento.

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se ensambló la polea de transmisión sobre el eje mediante su respectiva chaveta, garantizando la correcta transferencia de potencia desde el sistema motriz.

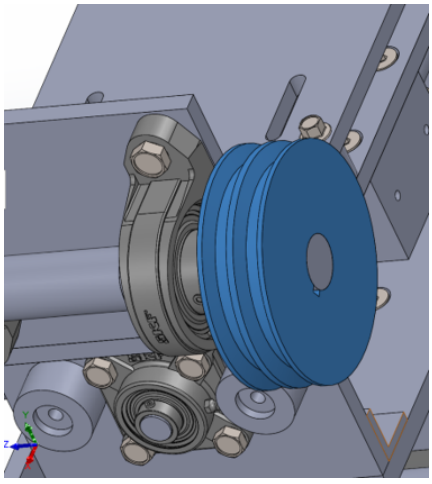


Figura 4.6.14: Polea de transmisión de dos canales montada sobre el eje de accionamiento del sistema, utilizada para transferir potencia mediante correas y generar el movimiento del mecanismo de pulido.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente se instaló la piedra abrasiva, la cual fue fijada mediante dos arandelas sujetadoras y cuatro pernos M8, completando el conjunto funcional del sistema de rectificado.

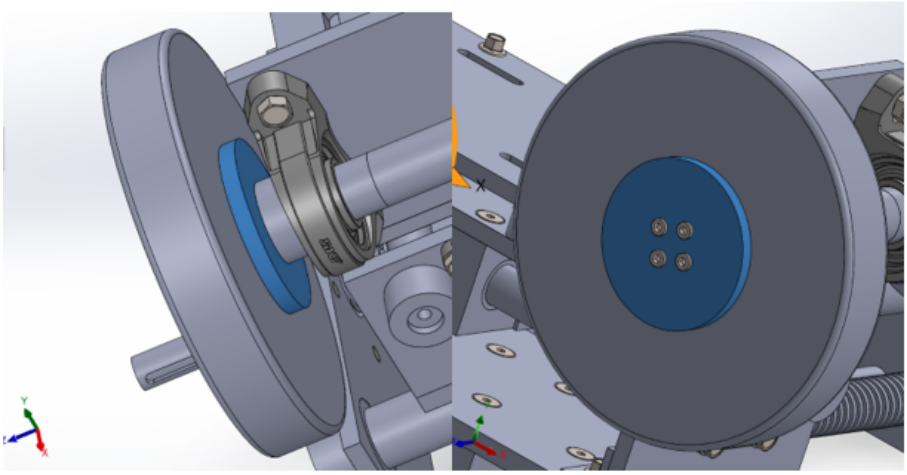


Figura 4.6.15: Montaje de la piedra abrasiva sobre el eje portaherramienta del sistema de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

4.6.5. Verificación del ensamble tridimensional

Una vez integrados todos los subconjuntos, se realizó la verificación del modelo tridimensional completo mediante las herramientas de análisis de interferencias y restricciones de SolidWorks. Esta etapa permitió comprobar la correcta interacción entre los componentes, validar los recorridos de desplazamiento de los sistemas transversal y longitudinal, y verificar la accesibilidad para operaciones de montaje y mantenimiento.

El resultado final fue un modelo digital completamente ensamblado que representa de manera precisa la configuración física de la máquina propuesta, constituyendo la base para las etapas posteriores de análisis estructural, elaboración de planos de fabricación y construcción del prototipo.

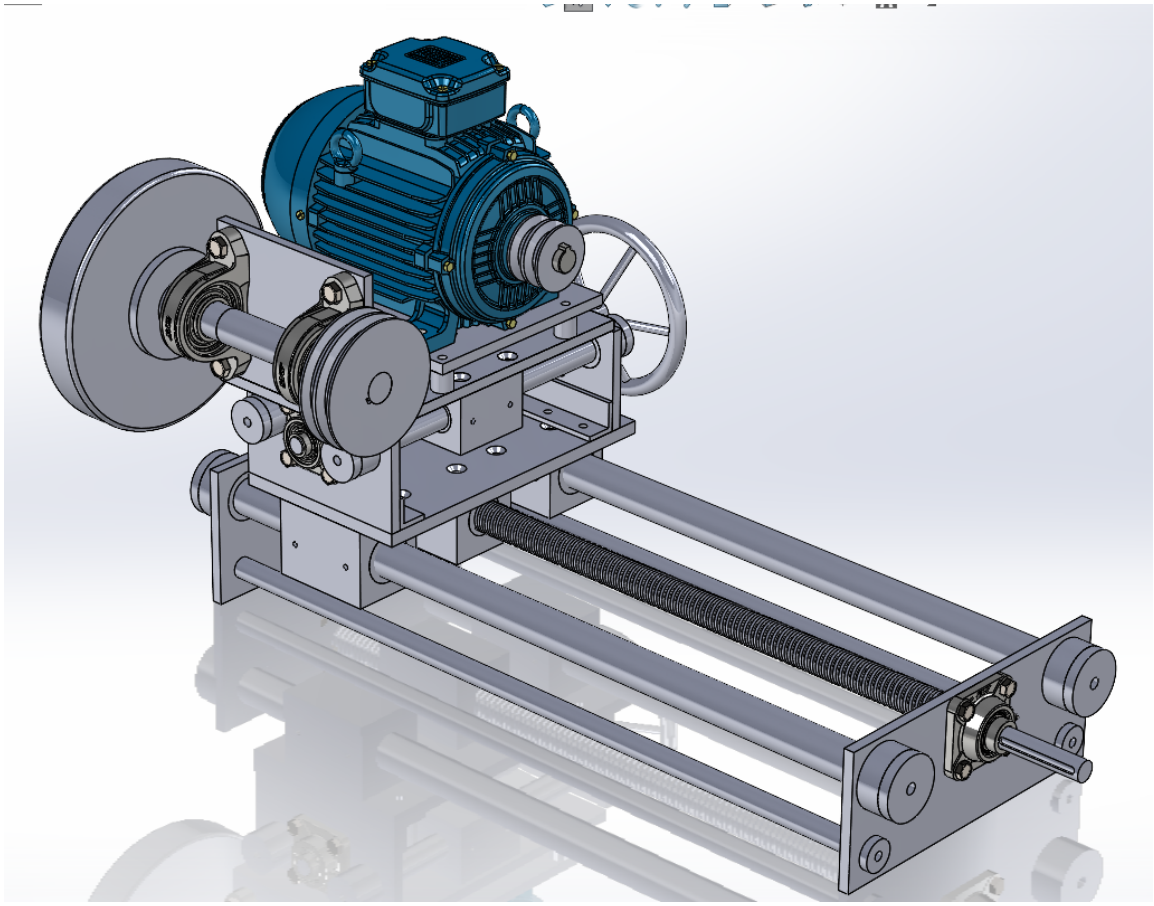


Figura 4.6.16: Modelo tridimensional del ensamble general del sistema de rectificado, compuesto por la estructura de soporte, motor eléctrico, sistema de transmisión por poleas y correas, husillo de avance, guías lineales y conjunto portapiedra abrasiva. El diseño integra los subsistemas de accionamiento, guiado y mecanizado para garantizar precisión y estabilidad durante la operación.

Fuente: elaboración propia.

4.7. Análisis por Elementos Finitos (FEA) del Carro Transversal

Para esta etapa del trabajo, se estudió y probó la rigidez de la parte más importante de una rectificadora de molinos: el carro donde van montados el eje y los rodamientos. Dado que las chumaceras utilizadas son termoplásticas (SKF SYK 40 TR), se parametrizaron en el software las propiedades de ese plástico reforzado, ya que la simulación de un polímero difiere significativamente de la simulación de metales. Además, se realizaron modificaciones en el diseño CAD para cambiar el grosor de las platinas y los ángulos de los pie amigos (refuerzos triangulares), con el objetivo de maximizar la rigidez de la máquina.

Con este análisis se lograron los siguientes hitos:

- Identificar los puntos débiles donde la estructura presenta mayor flexión.
- Verificar que el acero (A36 y AISI 1020) soporta los esfuerzos sin sufrir deformación permanente.
- Garantizar que la punta del eje no exceda la tolerancia de precisión.

Cumplimiento de la tolerancia de precisión: Para un proceso de rectificado de alta calidad, el objetivo era lograr un desplazamiento lo más cercano posible a 0,01 mm en la estructura, asegurando que la máquina no vibre ni pierda la medida durante el mecanizado. Aunque inicialmente el subensamblaje mostraba flexiones mayores en algunas zonas críticas, el rediseño y la adición de refuerzos (pie amigos y platinas base) rigidizaron el conjunto de manera óptima.

Éxito en la zona de corte (Piedra Rectificadora): El logro más importante del análisis es que, justo en la punta del eje donde va montada la piedra rectificadora, el desplazamiento final se redujo por debajo de 0,01 mm. Esto garantiza que en la zona real de trabajo —donde la herramienta toca la pieza del molino— la máquina se mantendrá firme y estable.

4.7.1. Procedimiento para el análisis

4.7.1.1. Paso 1: Preparación de la Geometría CAD (Entorno *Modeling*)

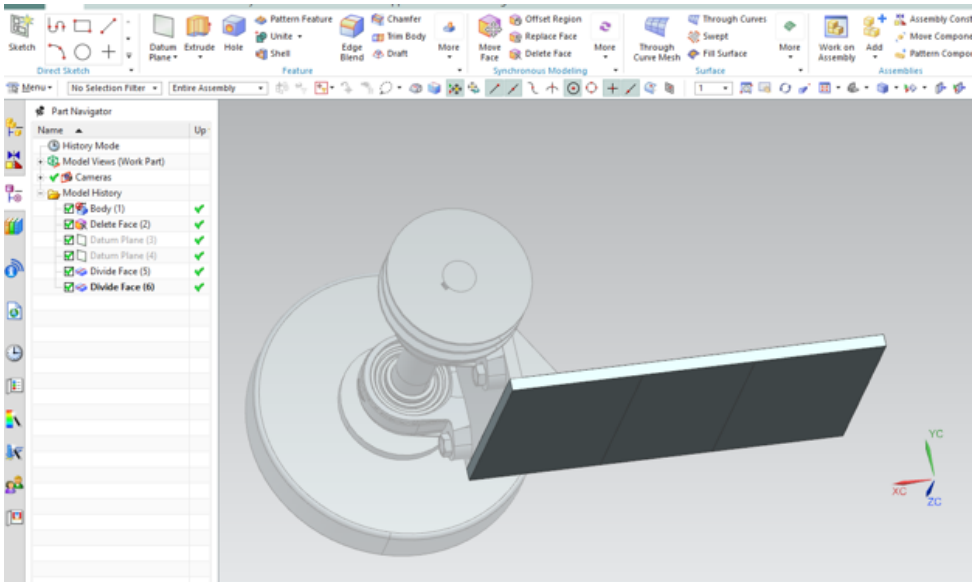


Figura 4.7.1: Simplificación del modelo 3D. El árbol de historial de modelado (izquierda) muestra las operaciones aplicadas: *Body (1)*, *Delete Face (2)*, *Datum Plane (3)*, *Datum Plane (4)*, *Divide Face (5)* y *Divide Face (6)*.

Antes de ingresar al entorno de simulación, se gestionó y simplificó la geometría en el

módulo de diseño de NX para optimizar el tiempo de cómputo y la calidad de la malla:

- **Modelado y Modificación de Geometría Directa:** Mediante comandos de modelado síncrono como `Delete Face`, se ajustaron y simplificaron algunas piezas.
- **Estructura del Ensamblaje:** El modelo consta de los siguientes componentes clave: eje para la piedra rectificadora, platinas de base, chumaceras termoplásticas industriales (SKF SYK 40 TR), refuerzos estructurales (pie amigos) y tornillería de sujeción (Grado 8).

4.7.1.2. Paso 2: Creación de los Archivos de Simulación (Módulos `.fem` y `.sim`)

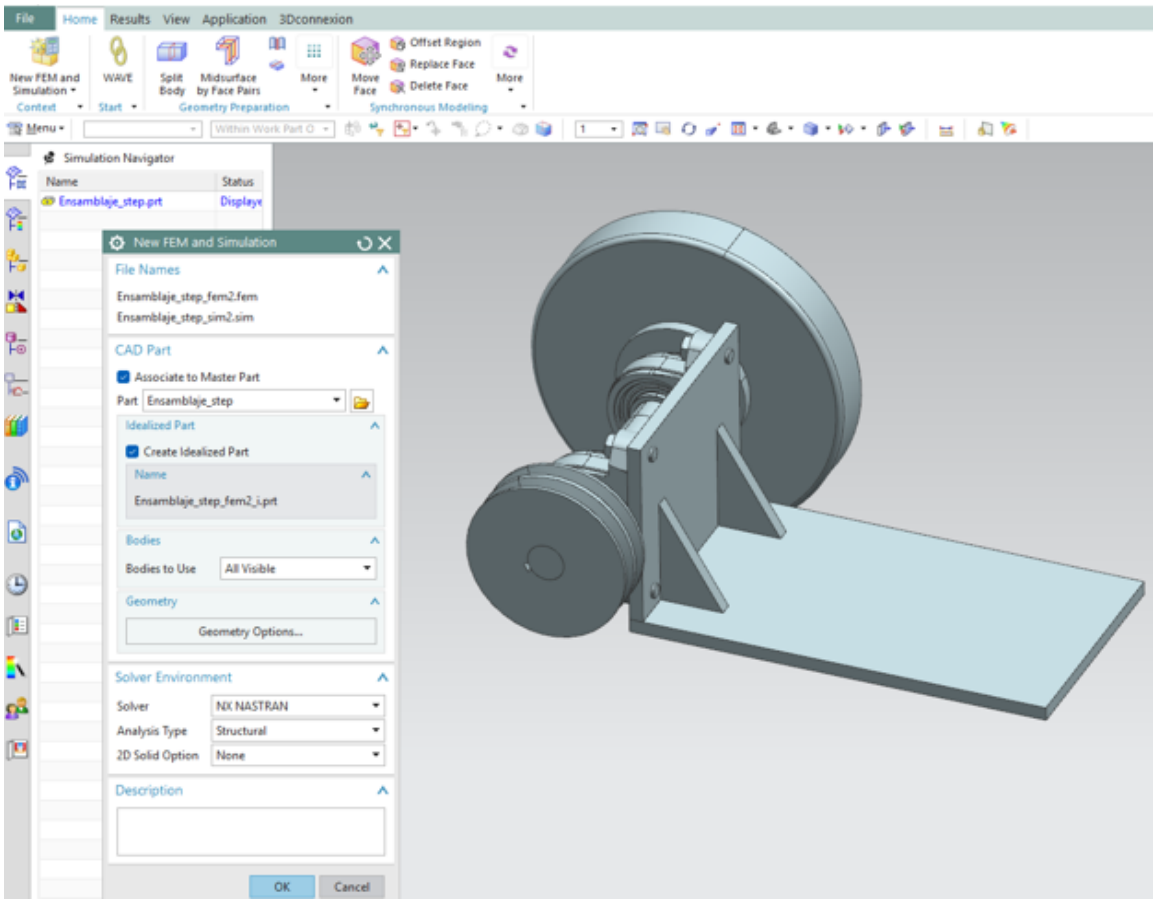


Figura 4.7.2: Configuración del entorno de simulación por elementos finitos (FEM) en Siemens NX, mediante el módulo *New FEM and Simulation*. Se establece la asociación al modelo maestro *Ensamblaje_step*, generando los archivos *Ensamblaje_step_fem2.fem* *Ensamblaje_step_sim2.sim*, con parte idealizada *Ensamblaje_step_fem_i.prt*. El solucionador seleccionado es *NX NASTRAN* con tipo de análisis estructural, considerando todos los cuerpos visibles del ensamblaje.

Fuente: elaboración propia.

- Se inicializó el módulo **NX Nastran** (Advanced Simulation).

- Se generó el archivo `.fem` **(Finite Element Model)**, que contiene las mallas, propiedades físicas y de materiales.
- Se generó el archivo `.sim` **(Simulation Model)**, que almacena las condiciones de frontera (restricciones, cargas estructurales y la definición del tipo de solución).

4.7.1.3. Paso 3: Definición y Asignación de Materiales (*Isotropic Materials* en `.fem`)

En el navegador de simulación se crearon y caracterizaron los colectores físicos asignando las propiedades mecánicas específicas para cada componente:

- **Acero Estructural (A36 / Steel-Rolled)**

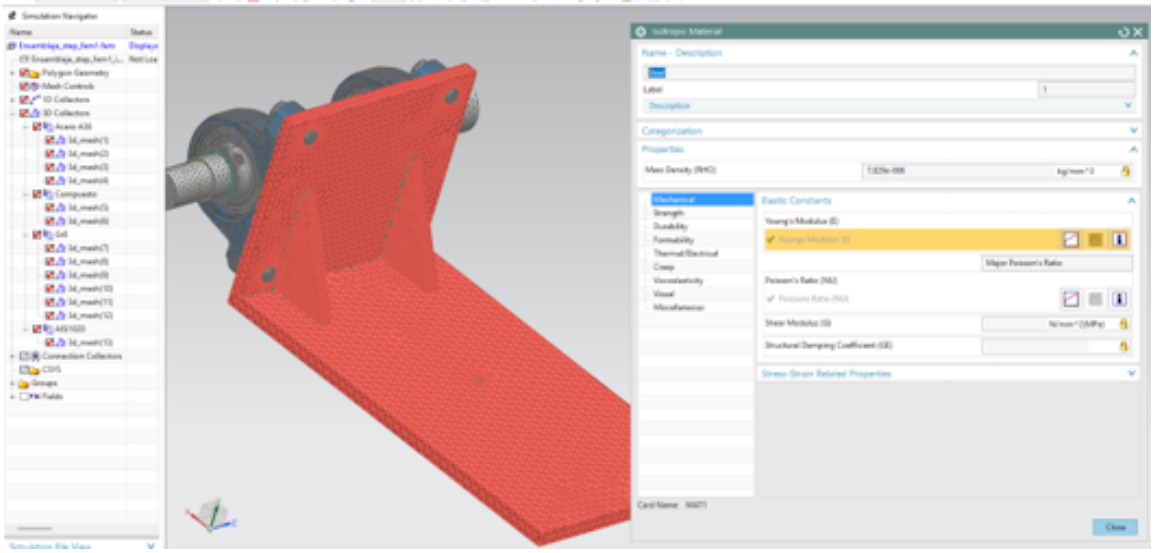


Figura 4.7.3: Asignación del material AISI 1 (Acero A36) a los componentes estructurales del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* muestra las propiedades mecánicas configuradas, incluyendo densidad másica de $1{,}47 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, módulo de Young, relación de Poisson y módulo cortante. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los sólidos a los que se les asigna dicho material dentro del árbol de simulación.

Fuente: elaboración propia.

- **Eje de la Piedra (Steel_AISI1020)**

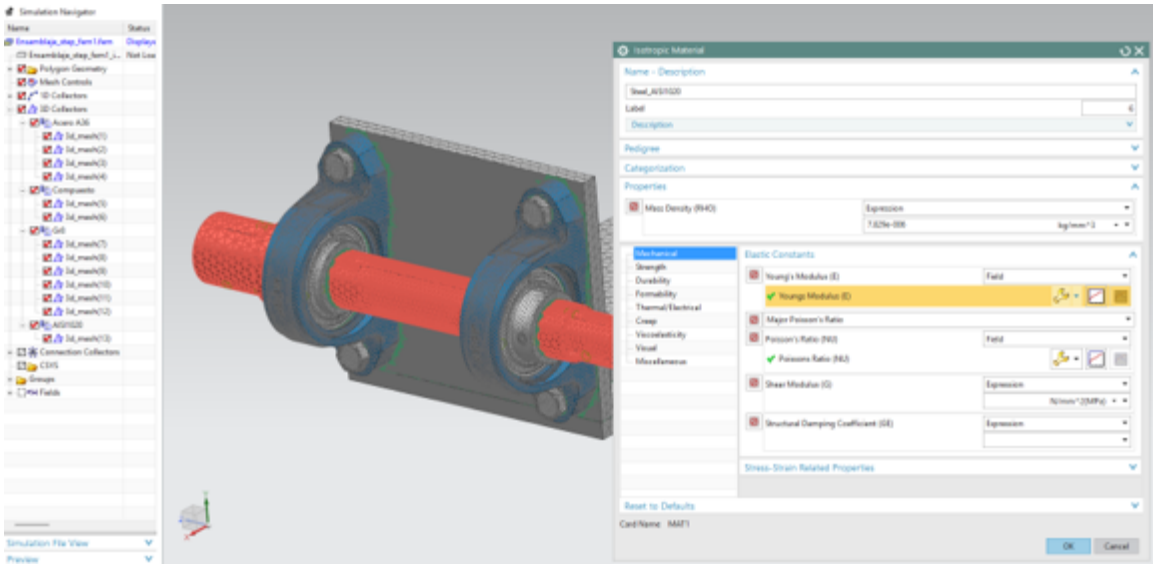


Figura 4.7.4: Asignación del material *Steel_AISI1020* al eje portapiedra del sistema de rectificado en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* presenta las propiedades mecánicas del acero AISI 1020, con densidad másica de $1{,}47 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, resaltando en amarillo las propiedades de módulo de Young y relación de Poisson como campos de entrada activos. El componente visualizado en rojo corresponde al eje al cual se le asigna el material, mientras que los rodamientos y demás elementos del ensamblaje se distinguen en azul y gris respectivamente.

Fuente: elaboración propia.

- **Tornillería de Alta Resistencia (Gr8):**

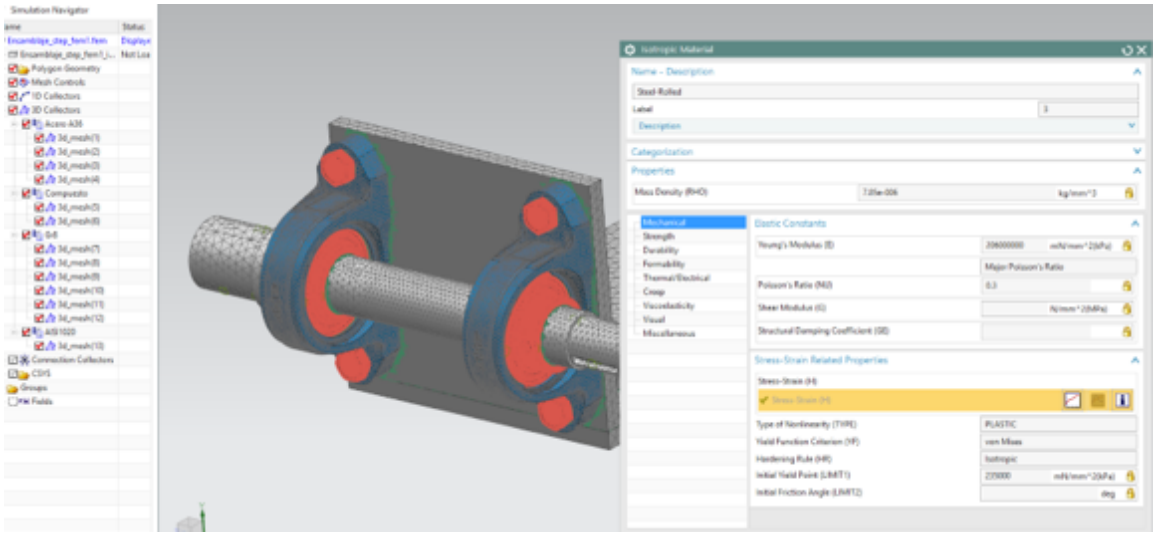


Figura 4.7.5: Asignación del material *Steel Rolled* a los elementos de tornillería (grado 8) del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* muestra las propiedades mecánicas configuradas: módulo de Young de 206000 N/mm^2, relación de Poisson de 0,3 y módulo cortante de 80 N/mm^2. Adicionalmente, en la sección *Stress-Strain Related Properties* se definen las propiedades plásticas del material, con tipo de nonlinealidad *PLASTIC*, criterio de fluencia de Von Mises, endurecimiento isotrópico y límite elástico inicial (*LIMIT1*) de 275 N/mm^2. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los tornillos a los que se asigna dicho material dentro del ensamblaje.

Fuente: elaboración propia.

- **Carcasa de las Chumaceras (Material Compuesto / Polímero Avanzado):** Dado que SKF no suministra directamente las propiedades estructurales de la carcasa del rodamiento SYK 40 TR, se parametrizó un material personalizado aproximado a un termoplástico industrial, denominado *Composite_PA_30FG* (Poliamida PA66 reforzada con 30 % de fibra de vidrio).

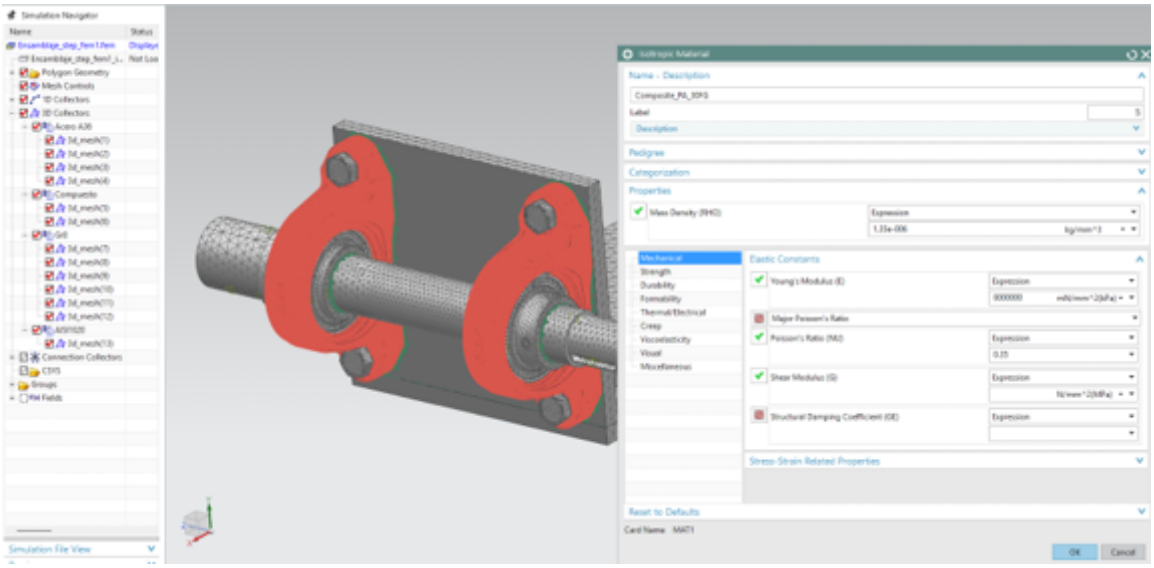


Figura 4.7.6: Asignación del material *Composite_PA_PPG* a los cuerpos de las chumaceras de soporte en el módulo de simulación de Siemens NX. La ventana *Isotropic Material* presenta las propiedades mecánicas del material compuesto de poliamida reforzada con polipropileno, con densidad másica de $1{,}12 \times 10^{-6}$ kg/mm^3, módulo de Young de 8000 N/mm^2, relación de Poisson de 0,35 y módulo cortante de 5,0 N/mm^2. Los componentes resaltados en rojo corresponden a los cuerpos de las chumaceras a los cuales se les asigna dicho material dentro del ensamblaje.

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4.7.1: Propiedades mecánicas y térmicas recomendadas para una poliamida PA66 reforzada con 30 % de fibra de vidrio.

Propiedad	**Valor recomendado**
Material equivalente	Poliamida (PA66) reforzada con 30 % fibra de vidrio
Densidad (ρ)	1.35 g/cm^3 (1350 kg/m^3)
Módulo de elasticidad (E)	8 GPa
Relación de Poisson (ν)	0.35
Resistencia a la tracción	140 MPa
Límite de fluencia	110 MPa
Resistencia a compresión	150 MPa
Resistencia a flexión	180 MPa
Resistencia al corte	75 MPa
Coeficiente de expansión térmica	$3{,}5 \times 10^{-5}$ /°C
Conductividad térmica	0.35 W/m·K

Fuente: elaboración propia con base en propiedades típicas de PA66 reforzada con fibra de vidrio.

Cuadro 4.7.2: Propiedades conservadoras utilizadas para el análisis estructural.

Propiedad	**Valor conservador**
Módulo de elasticidad	6 GPa
Límite de fluencia	80 MPa
Resistencia última	100 MPa
Densidad	1300 kg/m^3

Fuente: elaboración propia para condiciones de diseño conservadoras.

4.7.1.4. Paso 4: Generación de la Malla de Elementos Finitos (*Meshing* en `.fem`)

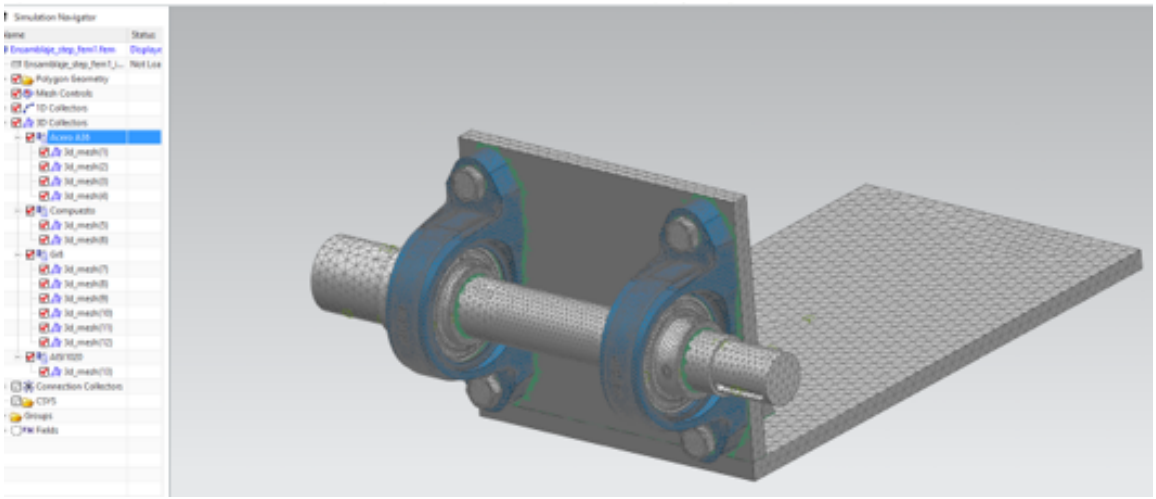


Figura 4.7.7: Discretización mediante malla de elementos finitos tridimensional del ensamblaje del sistema de soporte en Siemens NX. El árbol de simulación muestra las colecciones de malla generadas (*3d_ mesh(1)* a *3d_ mesh(13)*) para cada componente del ensamblaje, incluyendo el eje portapiedra, las chumaceras, la platina base y los elementos de tornillería. La malla tetraédrica aplicada permite capturar la geometría compleja de los componentes y garantizar la precisión en el cálculo de esfuerzos y deformaciones durante el análisis estructural.

Fuente: elaboración propia.

- Se utilizó una estrategia de **mallado sólido tridimensional (3D Collectors)**.
- Se aplicaron elementos **tetraédricos de segundo orden (CTETRA10)** para mapear adecuadamente las geometrías complejas y curvas de las carcasas de las chumaceras, el eje y los filetes de las cartelas.
- Se segmentó el árbol de mallas en cuatro colectores principales (*Acero A36*, *Compuesto*, *Gr8* y *AISI1020*) para garantizar la correcta herencia de propiedades

físicas independientes.

4.7.1.5. Paso 5: Definición de Conexiones y Contactos (*Simulation Object Container*)

Para transferir las cargas de forma realista entre el eje, los rodamientos y la estructura, se definieron condiciones de interacción mediante *Connection Collectors* en NX, asegurando la continuidad del ensamblaje o el deslizamiento relativo según la naturaleza física del contacto de los componentes.

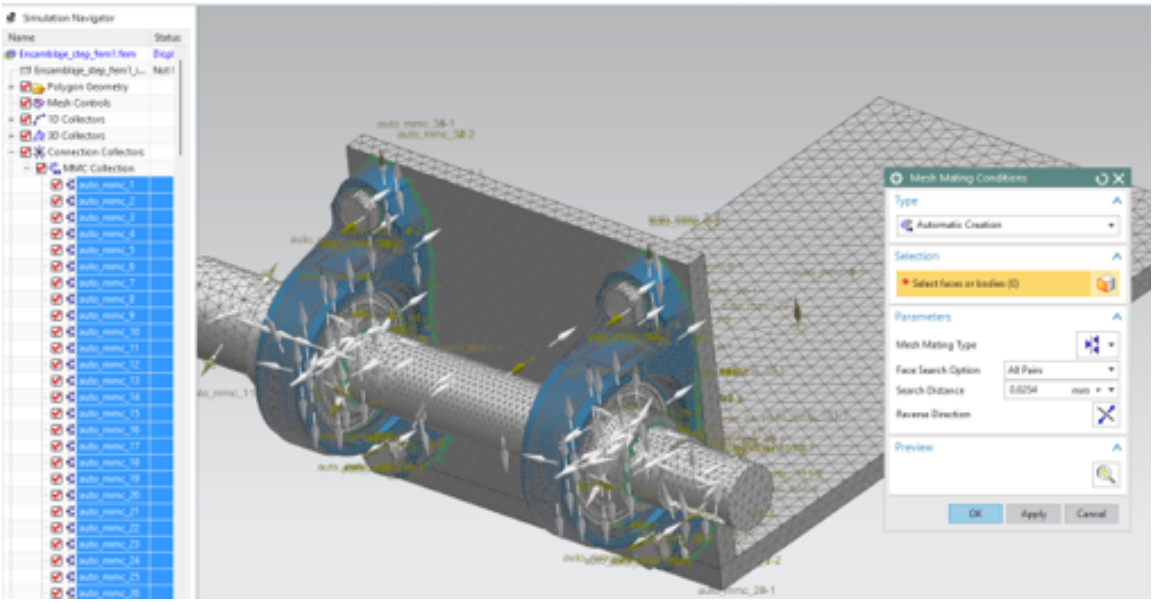


Figura 4.7.8: Definición de condiciones de contacto entre componentes del ensamblaje mediante la herramienta *Mesh Mating Conditions* en Siemens NX. La ventana de configuración establece la creación automática de conectores con tipo de búsqueda *All Pairs*, distancia de búsqueda de 0,0294 mm y dirección de renombramiento activada. El árbol de simulación muestra la colección *MMC Collection* con los pares de contacto generados entre las superficies del eje, las chumaceras, la platina base y los elementos de tornillería, garantizando la correcta transferencia de cargas entre los componentes durante el análisis estructural por elementos finitos.

Fuente: elaboración propia.

4.7.1.6. Paso 6: Configuración del Caso de Carga Estática y Restricciones (Entorno `.sim`)

Se estableció una solución estática lineal (**SOL 101 Linear Statics — Nastran**) abriendo el *Load Container*:

- **Condiciones de Frontera (*Constraints*):** Se aplicó una restricción fija (empotramiento completo / *Fixed Constraint*) en la cara inferior de la base del carro

transversal, simulando su anclaje al cuerpo rígido de la máquina rectificadora.

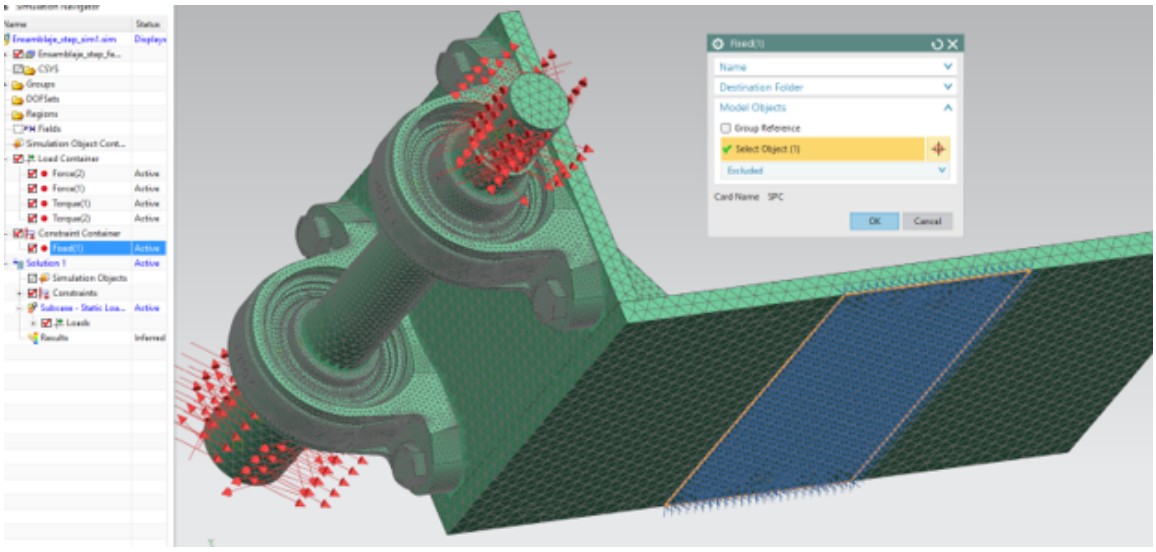


Figura 4.7.9: Aplicación de restricciones de desplazamiento (*Fixed*) sobre la superficie inferior de la platina base del ensamblaje en el módulo de simulación de Siemens NX.

Fuente: elaboración propia.

- **Cargas de Operación en el Eje (*Loads*):** Se introdujeron las fuerzas tangenciales, radiales y momentos torsores derivados del proceso de rectificado con la piedra.

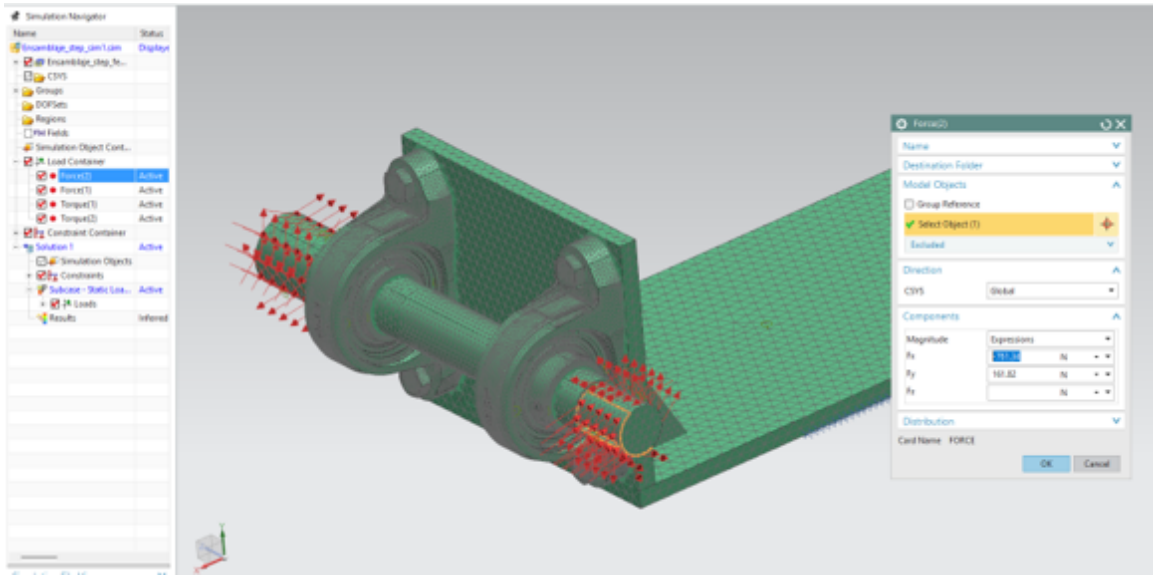


Figura 4.7.10: Aplicación de carga de fuerza distribuida (*Force*) sobre la superficie del eje en la zona de contacto con la polea de transmisión, en el módulo de simulación de Siemens NX.

Fuente: elaboración propia.

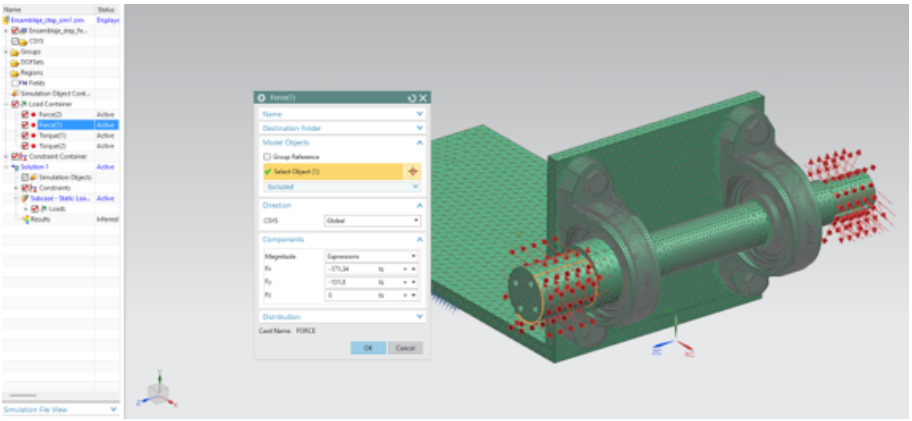


Figura 4.7.11: Aplicación de carga de fuerza (*Force*) sobre el extremo del eje en la zona de contacto con la piedra abrasiva, en el módulo de simulación de Siemens NX.

Fuente: elaboración propia.

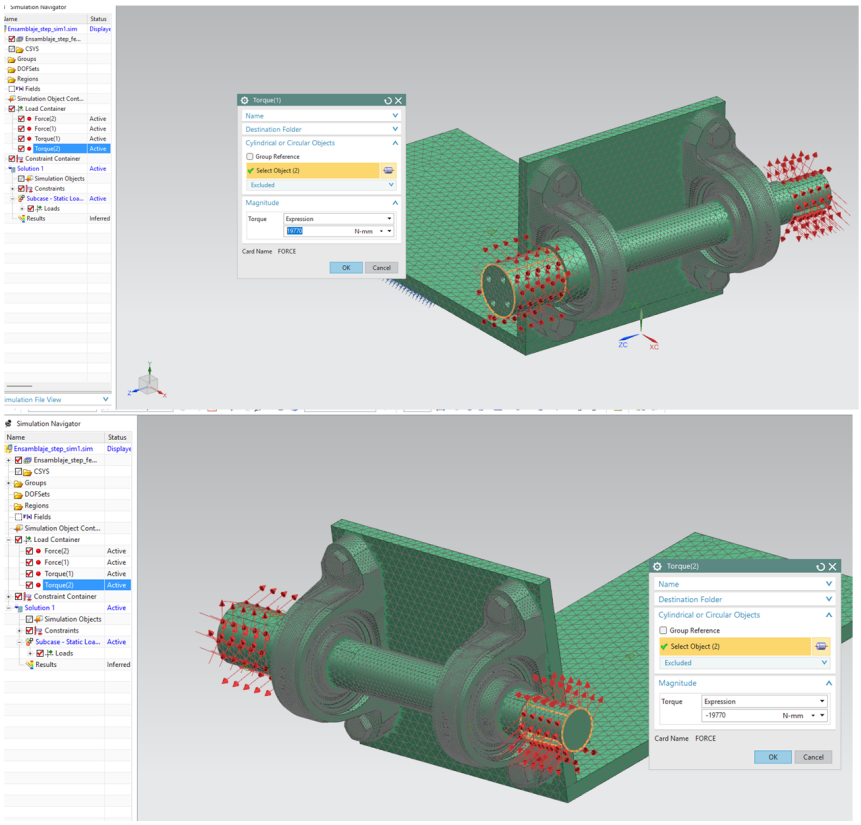


Figura 4.7.12: Aplicación de cargas de torque sobre el eje portapiedra del sistema de rectificado en el módulo de simulación de Siemens NX. (Superior) *Torque(1)* aplicado sobre el extremo del eje correspondiente a la zona de la polea de transmisión, con magnitud de 19770 N·mm en sentido positivo. (Inferior) *Torque(2)* aplicado sobre el extremo opuesto del eje en la zona de contacto con la piedra abrasiva, con magnitud de −19770 N·mm en sentido negativo, representando el par resistente durante la operación de rectificado. En ambos casos la carga se define sobre objetos cilíndricos o circulares (*Cylindrical or Circular Objects*), visualizándose mediante vectores rojos distribuidos sobre la circunferencia de las superficies seleccionadas.

Fuente: elaboración propia.

4.7.1.7. Paso 7: Ejecución del Solucionador (*Solve*)

- Se realizó la verificación del modelo (geometría libre, nodos duplicados y conectividad de mallas).
- Se ejecutó el solver **NX Nastran** para calcular las matrices de rigidez global, los vectores de desplazamientos nodales y las tensiones elementales.

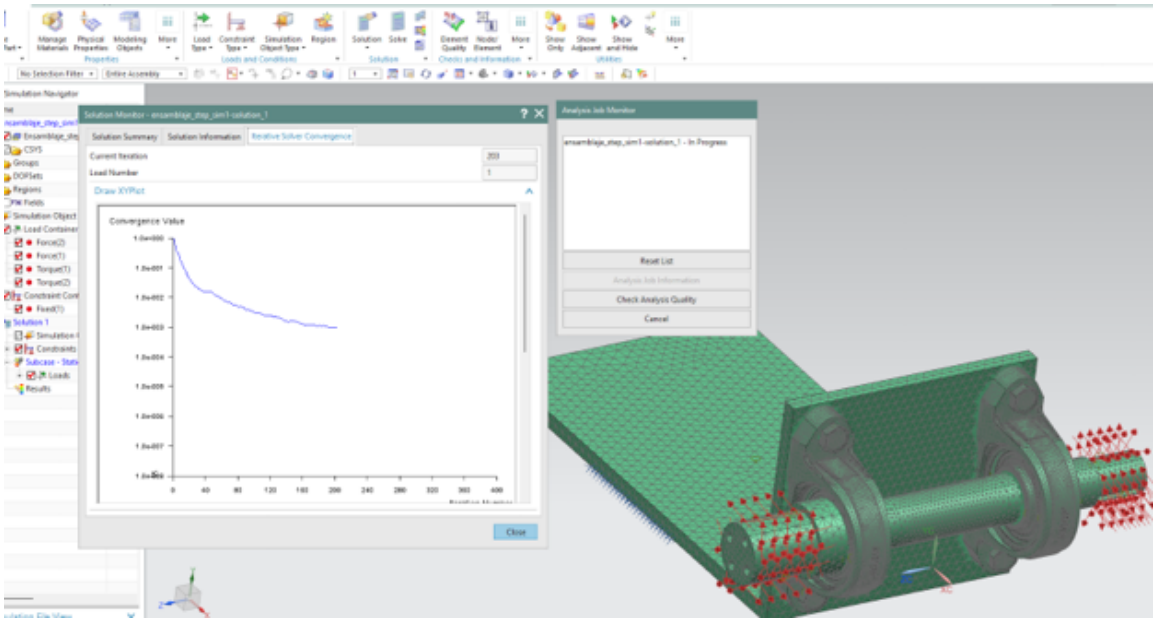


Figura 4.7.13: Proceso de solución del análisis estructural por elementos finitos en Siemens NX mediante el solucionador NX NASTRAN. La ventana *Solution Monitor* presenta el resumen de la solución con número de carga 1 y la gráfica de convergencia del valor residual (*Convergence Value*) en función de las iteraciones, mostrando una reducción progresiva desde 1×10^{-2} hasta 1×10^{-8}, lo que indica la correcta convergencia del modelo. La ventana *Analysis Job Monitor* confirma el estado del proceso *In Progress* para el archivo *ensamblaje_step_sim1-solution_1*, con las cargas de fuerza y torque activas visibles sobre la malla del ensamblaje.

Fuente: elaboración propia.

4.7.1.8. Paso 8: Postprocesamiento y Análisis de Resultados (*Post Processing Navigator*)

Tras completarse la convergencia de la solución estructural, se extrajeron los mapas de contorno bajo la subcarga estática (*Subcase — Static Loads 1*):

- **Análisis de Deformación Estructural (*Displacement — Nodal*):** El modelo registró un **desplazamiento máximo de 0,271 mm**, localizado de forma crítica en la punta del eje donde se monta la polea.

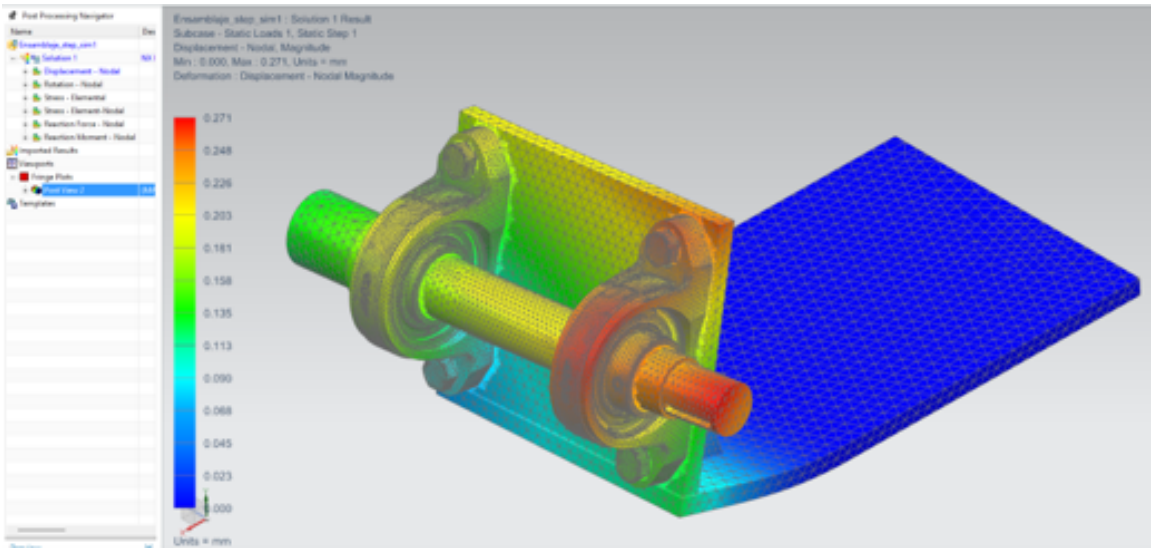


Figura 4.7.14: Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,271 mm (rojo), evidenciando que los desplazamientos más críticos se concentran en los extremos del eje portapiedra, particularmente en la zona de aplicación de las cargas de la piedra abrasiva y la polea de transmisión. La platina base y las chumaceras presentan desplazamientos mínimos, confirmando la rigidez de la estructura de soporte bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

- **Análisis de Esfuerzos Mecánicos (*Stress — Elemental Von-Mises*):** El criterio de Von Mises arrojó un **esfuerzo máximo de 43,29 MPa**, ubicado en las zonas de unión y soldadura de los elementos rigidizadores, valor muy por debajo del límite de fluencia del acero A36 (235 MPa), validando la seguridad del diseño ante fallas catastróficas.

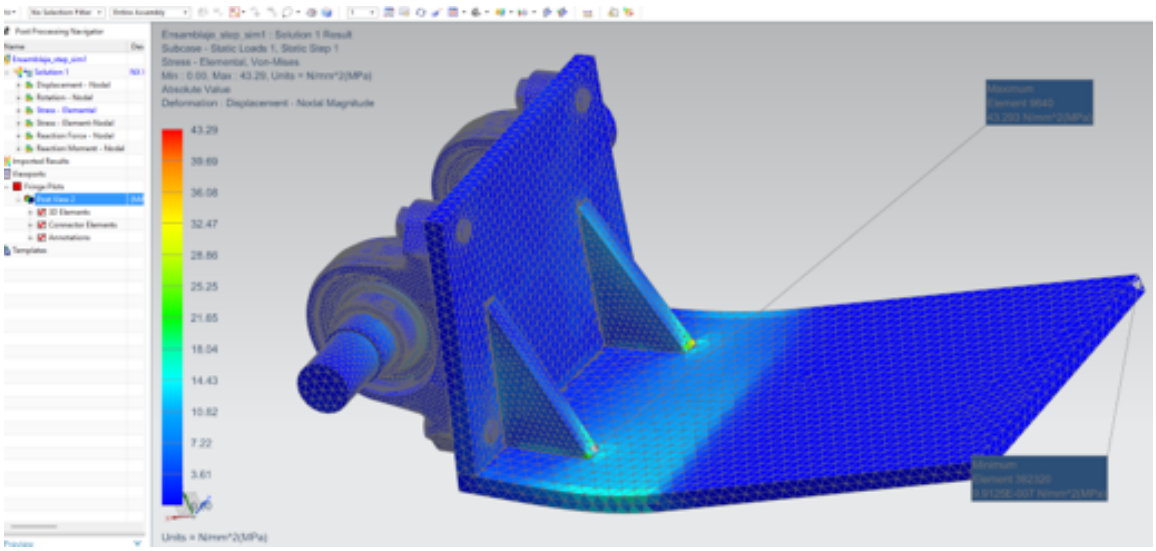


Figura 4.7.15: Distribución de esfuerzos de Von Mises (*Stress - Elemental Von-Mises*) obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de esfuerzo en N/mm^2 (MPa), con un mínimo de 0,00 MPa (azul) y un máximo de 43,25 MPa (rojo). Las concentraciones de esfuerzo más elevadas se localizan en las zonas de unión entre los refuerzos triangulares y la platina base de la chumacera, así como en los bordes de los orificios de tornillería, mientras que la mayor parte de la estructura presenta esfuerzos significativamente bajos. Los valores máximos obtenidos se encuentran por debajo del límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa), lo que confirma que el diseño opera dentro del rango elástico bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

4.7.2. Propuesta de Rediseño

4.7.2.1. Rediseño en Altura (Modificación del Ángulo de Inclinación)

Para cambiar la altura y la cobertura de apoyo de la cartela sobre la platina vertical, se modificó el ángulo de la cara inclinada:

- **Herramienta utilizada:** Comando `Move Face` dentro de la pestaña de Modelado Síncrono.
- **Configuración:** La opción de movimiento (*Motion*) se ajustó a `Angle`.
- **Ejecución:** Se seleccionó la cara inclinada de la cartela y se aplicó una variación exacta de **10°**. Esto hizo que la cartela ganara más altura y superficie de contacto en la platina vertical, aumentando la resistencia contra la fuerza que intenta volcar el soporte de las chumaceras.

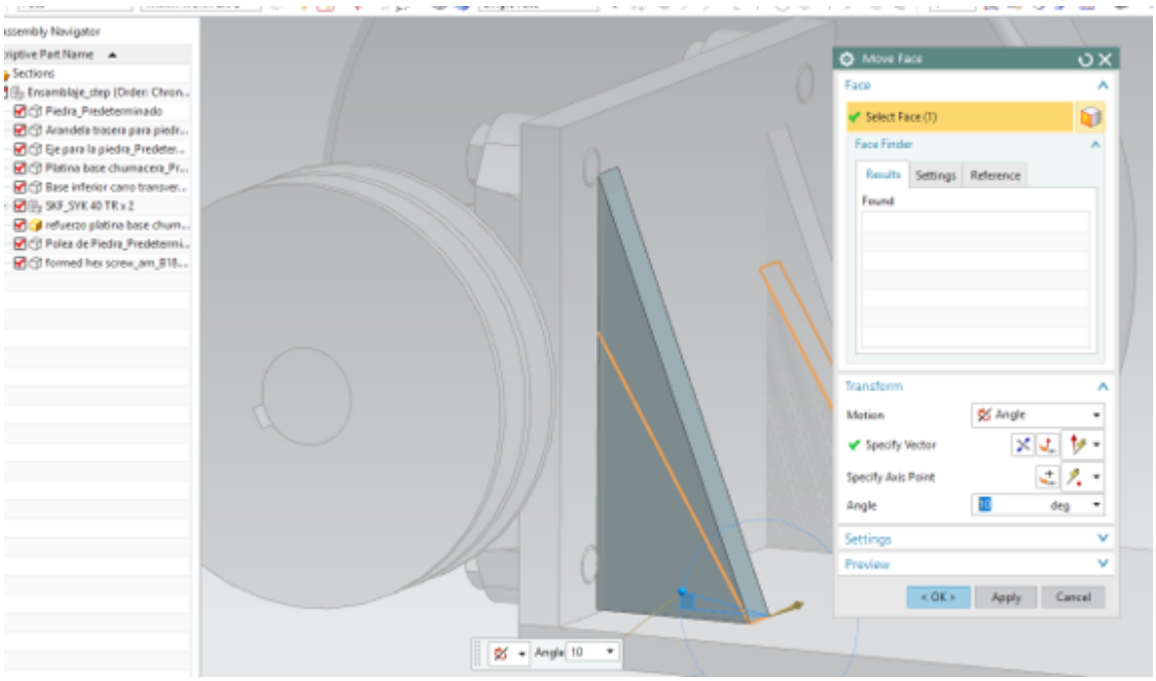


Figura 4.7.16: Rediseño paramétrico del ángulo de inclinación del refuerzo triangular de la platina base mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración permite modificar la cara seleccionada aplicando una transformación de tipo *Angle* sobre un vector y punto de eje especificados, con un valor de 10 como ángulo de rotación. La línea naranja indica el eje de referencia sobre el cual se ejecuta la modificación geométrica del refuerzo estructural, permitiendo evaluar configuraciones alternativas de rigidización de la estructura de soporte con el fin de optimizar la distribución de esfuerzos identificada en el análisis por elementos finitos.

Fuente: elaboración propia.

4.7.2.2. Rediseño en Espesor (Engrosamiento del Pie Amigo)

Para que el pie amigo no se pandee ni se flexione lateralmente con las fuerzas radiales y momentos del eje, se incrementó su grosor:

- **Herramienta utilizada:** Comando `Move Face`.
- **Configuración:** La opción de movimiento se configuró en `Distance`.
- **Ejecución:** Se aplicó un desfase de **3,175 mm** (equivalente a $\frac{1}{8}$ de pulgada en platinas comerciales). Con este aumento de espesor, la cartela se volvió mucho más robusta frente a los esfuerzos cortantes.

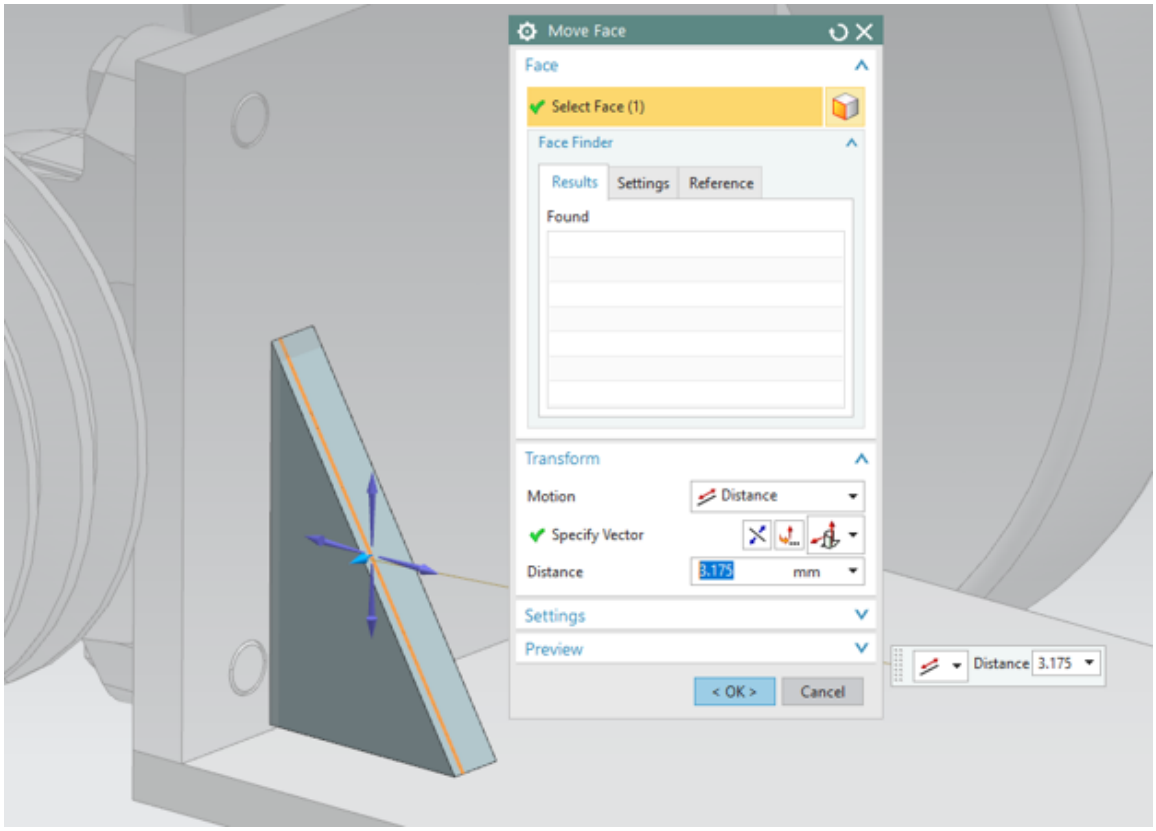


Figura 4.7.17: Modificación paramétrica del espesor del refuerzo triangular de la platina base mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración muestra una transformación de tipo *Distance* sobre la cara seleccionada, con un desplazamiento de 3,175 mm en la dirección del vector especificado, indicado mediante las flechas azules sobre la geometría. Esta modificación permite incrementar el espesor del refuerzo estructural triangular con el fin de reducir las concentraciones de esfuerzo identificadas en el análisis por elementos finitos previo, mejorando la rigidez y resistencia del soporte de la chumacera bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

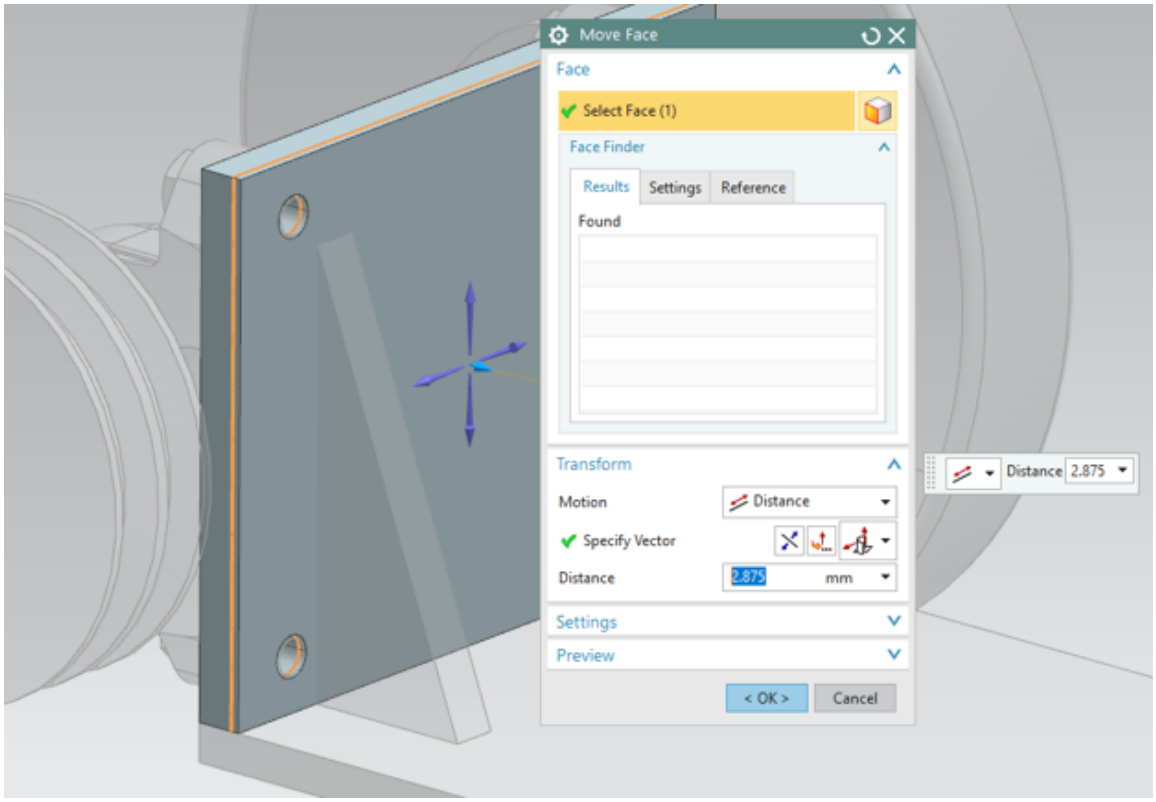


Figura 4.7.18: Modificación paramétrica del espesor de la platina base de soporte de la chumacera mediante la herramienta *Move Face* en Siemens NX. La ventana de configuración establece una transformación de tipo *Distance* sobre la cara frontal de la platina, con un desplazamiento de 2,875 mm en la dirección normal a la superficie, representado mediante las flechas azules sobre la geometría. Este incremento en el espesor de la platina base busca aumentar la rigidez del soporte y redistribuir los esfuerzos concentrados en las zonas críticas detectadas durante el análisis estructural por elementos finitos, contribuyendo a mejorar el comportamiento mecánico del ensamblaje bajo las condiciones de operación del sistema de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

4.7.2.3. Actualización en el Entorno de Simulación (`.fem`)

Una vez terminados los cambios geométricos en el CAD, el software actualizó automáticamente el modelo de elementos finitos:

- Al abrir de nuevo el archivo `.fem`, el navegador de mallas detectó el cambio geométrico.
- El colector de mallas asignado al *Acero A36* se remalló automáticamente con elementos tetraédricos, adaptándose a la nueva altura y al nuevo espesor de los pie amigos optimizados.

Los cambios registrados en esta iteración no fueron significativamente diferentes respecto al análisis anterior.

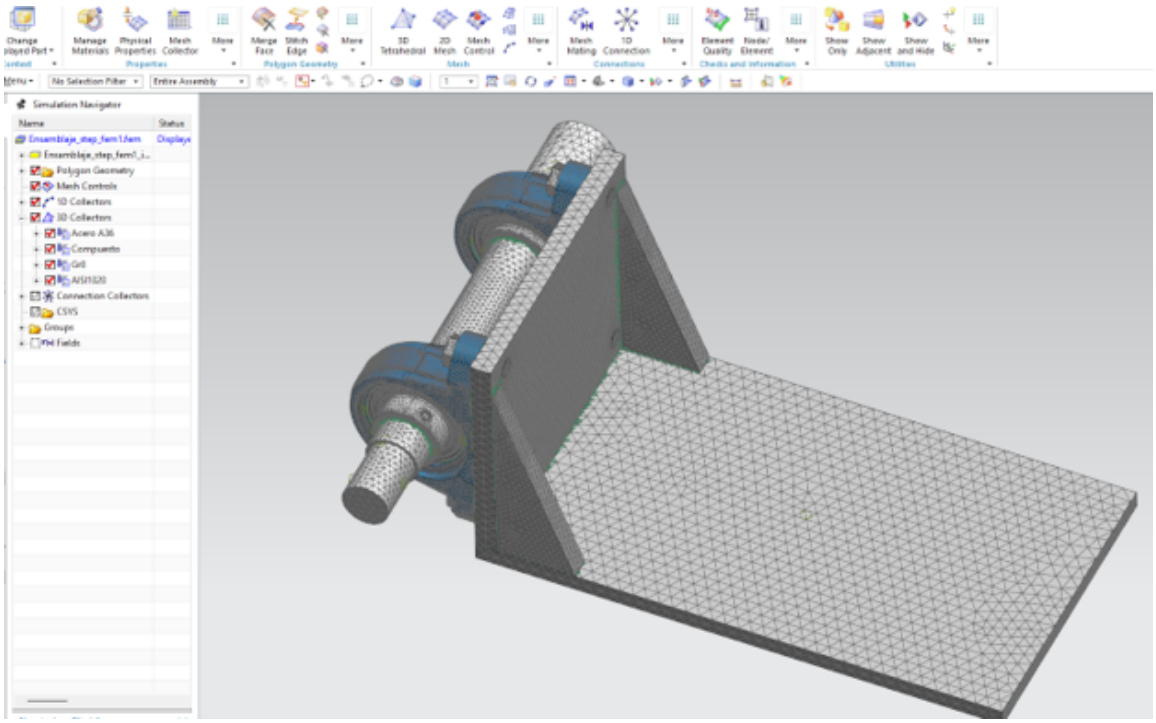


Figura 4.7.19: Modelo de elementos finitos actualizado del ensamblaje rediseñado en Siemens NX.

Fuente: elaboración propia.

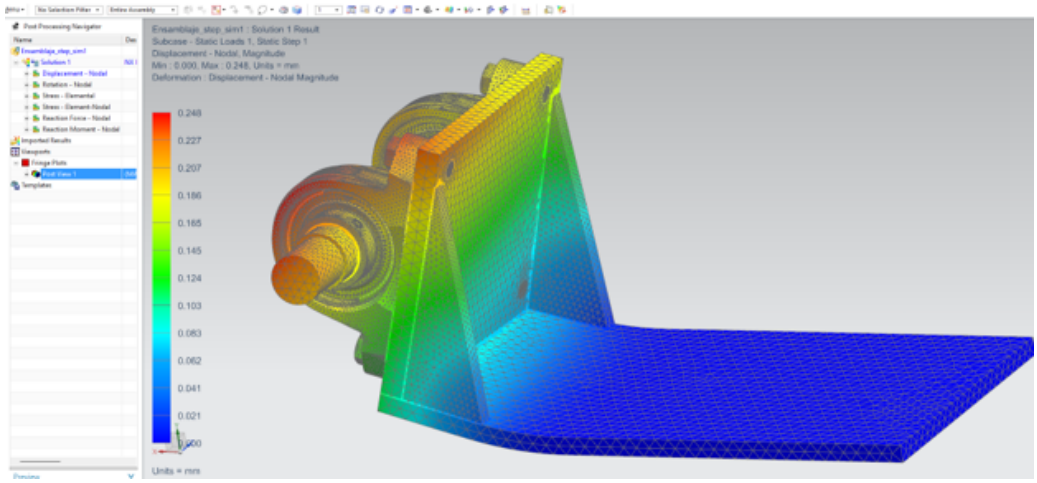


Figura 4.7.20: Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) del ensamblaje rediseñado, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,248 mm (rojo), evidenciando una reducción del desplazamiento máximo respecto al diseño original (0,271 mm). Las deformaciones más elevadas continúan concentrándose en los extremos del eje portapiedra, mientras que la platina base y los refuerzos triangulares presentan desplazamientos considerablemente menores, confirmando que las modificaciones geométricas implementadas contribuyen a mejorar la rigidez global del ensamblaje bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

4.7.3. El Dilema: Rigidez vs. Peso

En el diseño inicial, los pie amigos eran más delgados y bajos para mantener la máquina ligera. Sin embargo, al simular las fuerzas reales de la piedra rectificadora, se descubrió que la estructura se torcía en exceso (superando el objetivo de 0,01 mm). Dado que la prioridad absoluta de una rectificadora es la precisión del maquinado, se tomó la decisión técnica de **sacrificar peso** (incorporar más acero A36) para obtener la rigidez necesaria en el carro transversal.

El pie amigo se rediseñó, pasando de un triángulo simple a un perfil plano trapezoidal más robusto, con las siguientes modificaciones dimensionales:

- **Aumento de la Altura de Apoyo Vertical (180,0 mm):** La cartela cubre completamente la altura de la platina vertical, distribuyendo las fuerzas de empuje a lo largo de toda la pared del soporte.
- **Aumento de la Base de Apoyo Horizontal (100,0 mm):** Al alargar la base se crea un brazo de palanca más largo que contrarresta eficazmente el momento torsor generado por el eje y la polea.
- **Creación de un "Hombro" Superior (30,0 mm):** En lugar de terminar en una punta triangular delgada, se añadió un plano superior horizontal de 30 mm que refuerza la zona de concentración de tensiones detrás de los tornillos superiores de las chumaceras.
- **Modificación del Ángulo de Inclinación (30,0°):** La inclinación principal de la cartela se controló con un ángulo de 30° respecto a la vertical, generando una caída diagonal rígida que evita la concentración de esfuerzos cortantes en las esquinas de la soldadura.

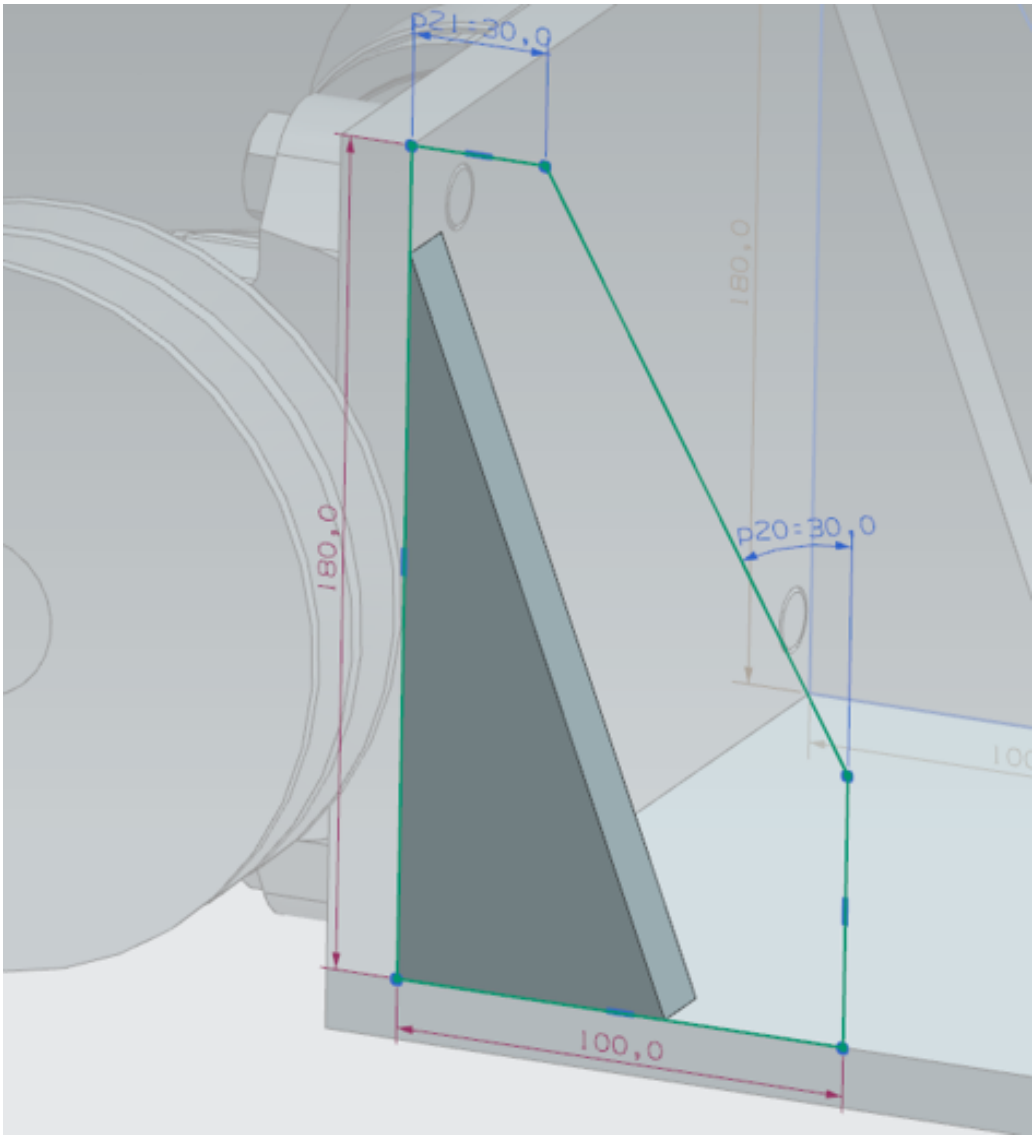


Figura 4.7.21: Geometría actualizada del refuerzo triangular de soporte de la chumacera tras el proceso de rediseño en Siemens NX. Las cotas paramétricas indican las dimensiones modificadas del componente: base de 100,0 mm, altura de 180,0 mm, ancho superior de $P21 = 20{,}0$ mm y ancho inferior de $P20 = 30{,}0$ mm, reflejando el incremento de espesor aplicado mediante la herramienta *Move Face*. La geometría trapezoidal resultante del refuerzo permite una mejor distribución de los esfuerzos a lo largo de su sección transversal, reduciendo las concentraciones de tensión identificadas en el análisis estructural por elementos finitos del diseño original.

Fuente: elaboración propia.

4.7.3.1. Resultados del Diseño Final

4.7.3.1.1. Análisis de Deformación y Desplazamiento (Criterio de Rigidez)

- **Zona de la Piedra Rectificadora:** El desplazamiento en el extremo del eje donde va montada la herramienta **se ubicó por debajo del límite crítico de** 0,01 **mm**. En el mapa de contorno, esta zona ya no presenta colores de alerta (rojos o naranjas

intensos).

- **Comportamiento del Carro Transversal:** La flexión general del soporte vertical de las chumaceras se redujo prácticamente a cero. Gracias al nuevo perfil de las cartelas (180 mm de altura y 100 mm de base), el efecto "palanca" fue neutralizado, garantizando la ausencia de vibraciones destructivas (*chatter*) y de errores de paralelismo durante el rectificado.

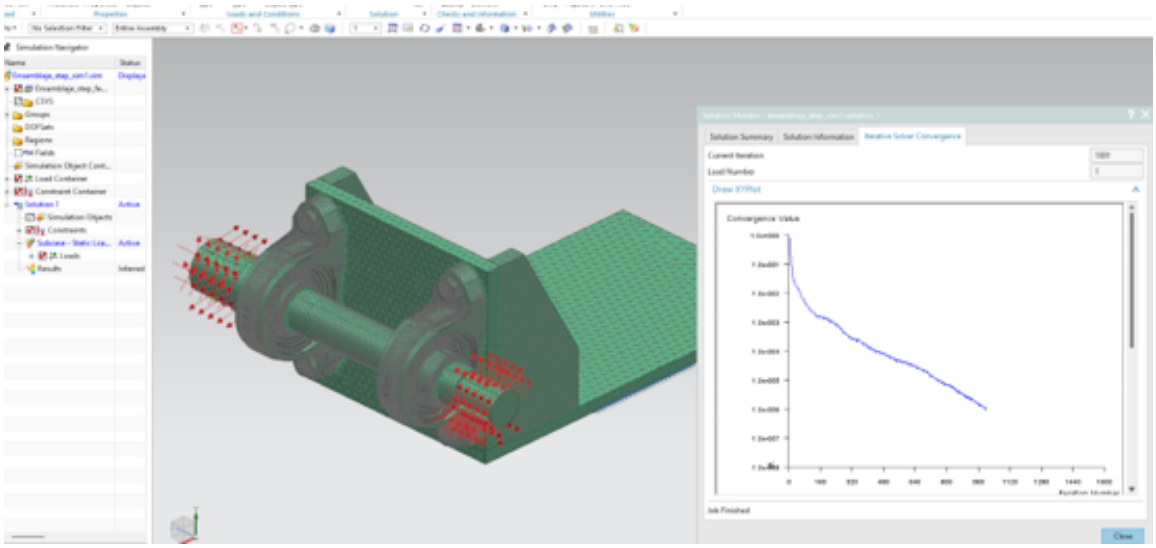


Figura 4.7.22: Proceso de solución del análisis estructural por elementos finitos del ensamblaje rediseñado en Siemens NX NASTRAN. La ventana *Solution Monitor* presenta la gráfica de convergencia del valor residual (*Convergence Value*) en función del número de iteraciones, mostrando una reducción progresiva y estable desde 1×10^{-4} hasta 1×10^{-7} a lo largo de aproximadamente 1400 iteraciones, confirmando la correcta convergencia del modelo rediseñado. El árbol de simulación muestra la solución activa con el subcase de carga estática (*Subcase - Static Loads*) y las cargas de fuerza y torque aplicadas, visibles mediante los vectores rojos distribuidos sobre los extremos del eje portapiedra en el modelo de malla.

Fuente: elaboración propia.

4.7.3.1.2. Análisis de Esfuerzos de Von Mises (Criterio de Resistencia)

- **Esfuerzo Máximo:** El esfuerzo máximo en las zonas críticas de unión y soldadura se estabilizó en **32,72 MPa**.

- **Factor de Seguridad:** Considerando el límite de fluencia del acero A36 (250 MPa), el factor de seguridad resulta:

$$FS = \frac{250\,\text{MPa}}{32{,}72\,\text{MPa}} \approx 7{,}64 \tag{4.7.1}$$

Un factor de seguridad superior a 7 es excelente para una máquina herramienta de

taller, ya que garantiza soporte ante sobrecargas accidentales y fatiga por uso continuo.

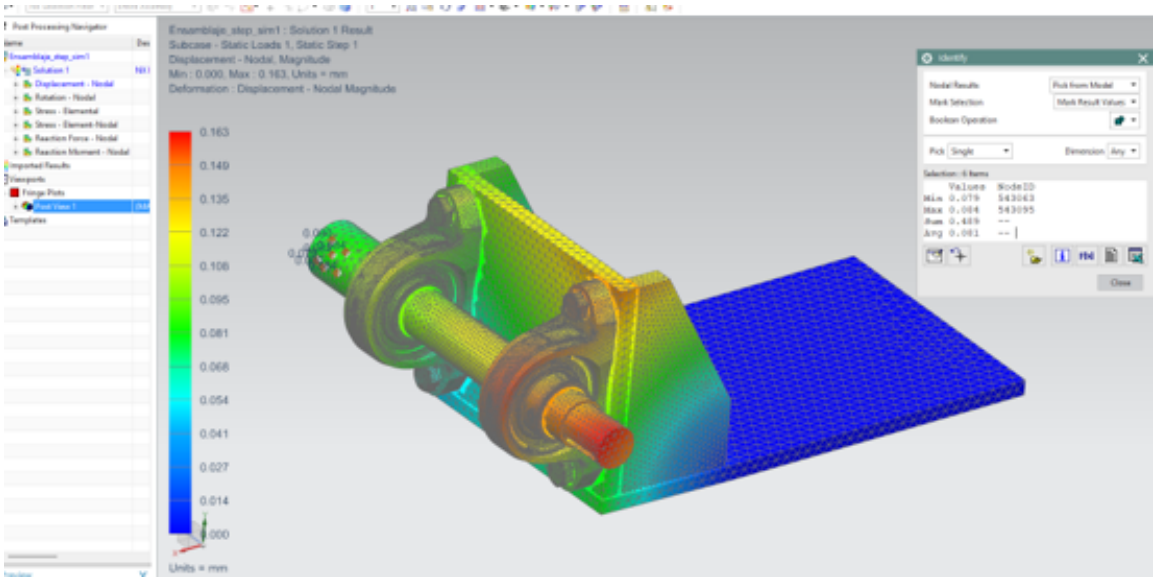


Figura 4.7.23: Distribución de desplazamientos nodales (*Displacement - Nodal Magnitude*) del ensamblaje con rediseño final, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de deformación en mm, con un mínimo de 0,000 mm (azul) y un máximo de 0,163 mm (rojo). El panel *Identify* muestra los valores nodales en el punto crítico: valor máximo de $8{,}0 \times 10^{-2}$ mm, mínimo de $5{,}43 \times 10^{-3}$ mm y valor promedio de $4{,}1 \times 10^{-2}$ mm. Los resultados evidencian una reducción significativa del desplazamiento máximo respecto a los diseños anteriores (0,271 mm y 0,248 mm), concentrándose las deformaciones más elevadas en el extremo del eje correspondiente a la zona de la piedra abrasiva, mientras que la estructura de soporte permanece prácticamente rígida.

Fuente: elaboración propia.

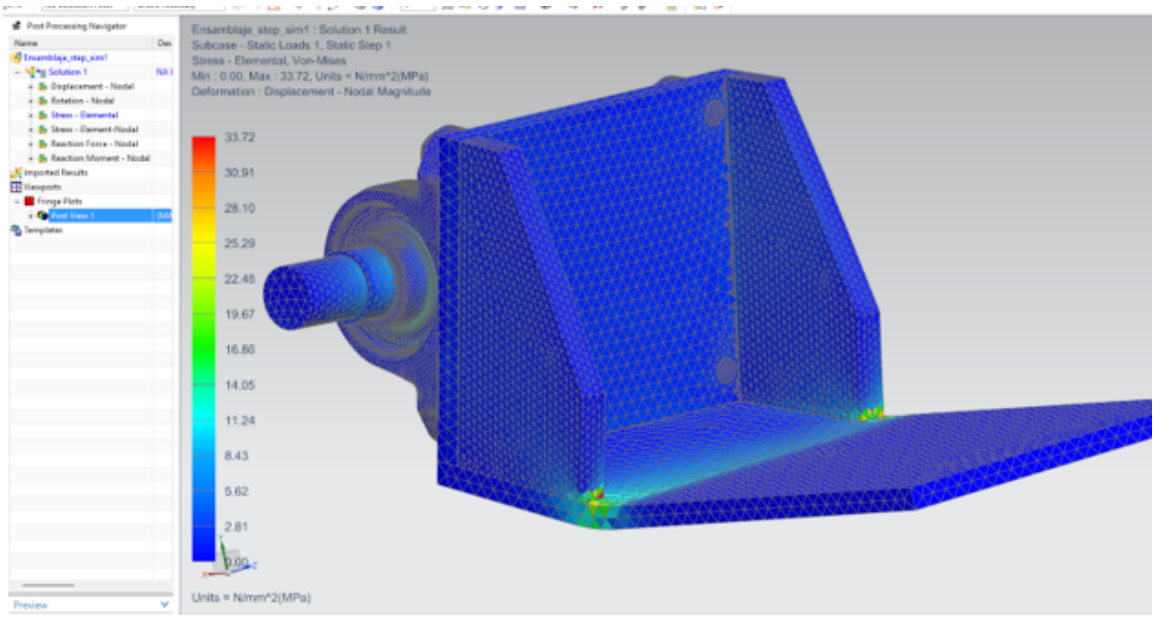


Figura 4.7.24: Distribución de esfuerzos de Von Mises (*Stress - Elemental Von-Mises*) del ensamblaje con rediseño final, obtenida del análisis estructural estático por elementos finitos en Siemens NX NASTRAN. La escala de colores indica los valores de esfuerzo en $\mathrm{N/mm^2}$ (MPa), con un mínimo de 0,00 MPa (azul) y un máximo de 33,72 MPa (rojo), representando una reducción del esfuerzo máximo respecto al diseño original (43,25 MPa), equivalente a una mejora del 22,0 %. Las concentraciones de esfuerzo más elevadas se localizan puntualmente en las esquinas inferiores de la platina base, mientras que los refuerzos triangulares y la cara frontal de soporte presentan una distribución uniforme y de baja magnitud. Los valores máximos obtenidos se mantienen ampliamente por debajo del límite elástico del acero A36 ($\sigma_y = 250$ MPa), confirmando la integridad estructural del diseño optimizado bajo las condiciones de carga del proceso de rectificado.

Fuente: elaboración propia.

4.8. Obtención del peso del ensamblaje mediante las propiedades físicas de SolidWorks

Para determinar la masa total de la máquina diseñada, se utilizó la herramienta *Propiedades físicas* (*Mass Properties*) de SolidWorks, la cual permite calcular automáticamente parámetros físicos tales como masa, volumen, área superficial, centro de gravedad y momentos de inercia a partir del modelo tridimensional y de las propiedades de los materiales asignados a cada componente.

El procedimiento desarrollado para la obtención de la masa del ensamblaje fue el siguiente:

1. Se completó el modelado tridimensional de todas las piezas que conforman el ensamblaje de la máquina rectificadora portátil.

2. A cada componente se le asignó el material correspondiente desde la biblioteca de materiales de SolidWorks, garantizando que las propiedades de densidad utilizadas fueran representativas de los materiales considerados para la fabricación del equipo.

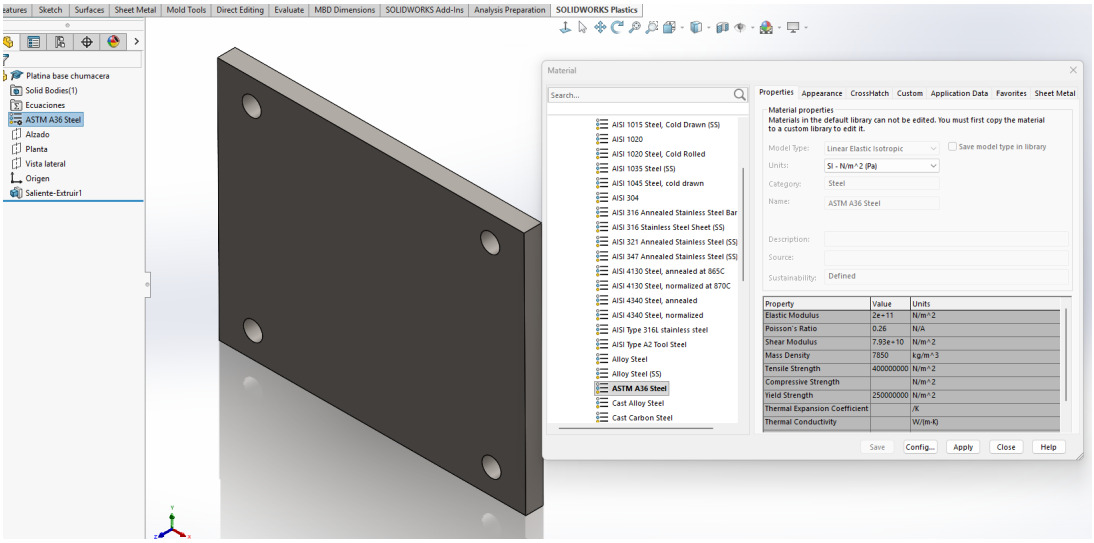


Figura 4.8.1: Asignación del material ASTM A36 Steel a uno de los componentes del ensamblaje mediante la biblioteca de materiales de SolidWorks. Esta configuración permite definir las propiedades mecánicas y la densidad necesarias para los cálculos de masa y simulación estructural.

Fuente: elaboración propia.

3. Una vez finalizado el ensamblaje, se accedió a la pestaña *Evaluar* (*Evaluate*) y posteriormente se seleccionó la opción *Propiedades físicas* (*Mass Properties*).

4. En la ventana de resultados se verificó la inclusión de todos los componentes del conjunto, asegurando que los elementos sólidos modelados fueran considerados en el cálculo global.

5. SolidWorks realizó automáticamente el cálculo de las propiedades físicas del ensamblaje, obteniéndose valores correspondientes a masa, volumen, área superficial, centro de masa y momentos principales de inercia.

Como resultado del análisis, se determinó que la masa total del ensamblaje es de **148,86 kg**, valor que corresponde al modelo CAD completo de la máquina diseñada. Este resultado constituye un parámetro fundamental para la evaluación de la portabilidad del equipo, el dimensionamiento de sus elementos estructurales y la planificación de las operaciones de transporte, montaje y mantenimiento.

La Figura 4.8.2 presenta la ventana de propiedades físicas generada por SolidWorks, donde

se observa el valor de masa obtenido para el ensamblaje completo.

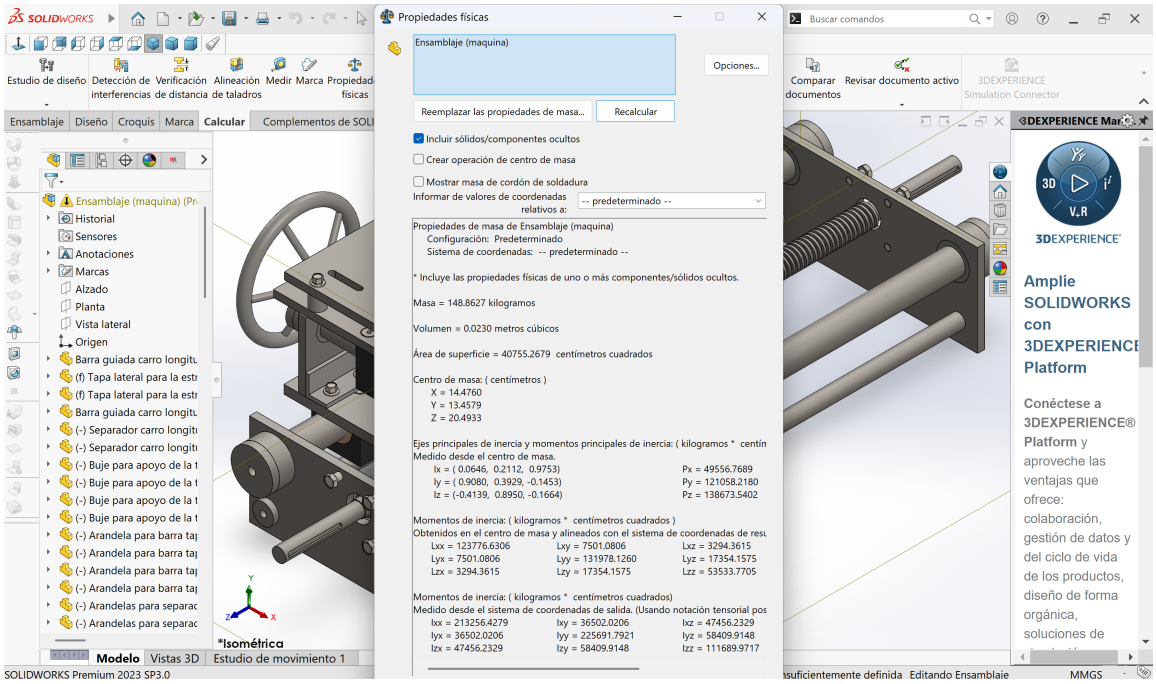


Figura 4.8.2: Propiedades físicas del ensamblaje obtenidas mediante la herramienta Mass Properties de SolidWorks.

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 5

Discusión

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto permiten afirmar que el diseño de una máquina rectificadora portátil para el mantenimiento de masas de molinos trituradores representa una solución técnicamente viable frente a una problemática que afecta directamente la disponibilidad operativa, los costos de mantenimiento y la calidad del proceso productivo en la industria del adobe. La propuesta desarrollada modifica el paradigma tradicional de mantenimiento basado en desmontaje y traslado hacia talleres especializados, permitiendo migrar hacia estrategias de intervención en sitio con menores tiempos de inactividad y mayor capacidad de respuesta operativa.

Uno de los principales desafíos identificados durante el desarrollo fue lograr un equilibrio adecuado entre portabilidad y rigidez estructural. En máquinas herramienta convencionales, la precisión suele estar asociada a estructuras de gran masa que reducen vibraciones y deformaciones; sin embargo, en aplicaciones portátiles esta condición se convierte en una restricción crítica. Los resultados obtenidos muestran que, mediante una distribución estratégica del material y la optimización geométrica de los elementos estructurales, fue posible alcanzar niveles adecuados de rigidez sin comprometer la movilidad del equipo, demostrando que la reducción de peso no necesariamente implica pérdidas significativas de desempeño mecánico cuando se aplican criterios adecuados de diseño.

La validación estructural mediante análisis por elementos finitos permitió evidenciar que el comportamiento mecánico del sistema satisface los requerimientos de resistencia establecidos para las condiciones de operación propuestas. La identificación de

concentraciones de esfuerzos en las zonas de unión entre refuerzos y elementos estructurales principales permitió implementar modificaciones geométricas que mejoraron la distribución de cargas y redujeron la magnitud de los esfuerzos máximos. La disminución del desplazamiento máximo desde 0,271 mm hasta 0,163 mm y la reducción de esfuerzos de Von Mises desde 43,25 MPa hasta 33,72 MPa evidencian que los procesos iterativos de optimización generan mejoras significativas tanto en rigidez como en estabilidad estructural, aspectos fundamentales para mantener tolerancias dimensionales cercanas a $\pm$0,1 mm durante las operaciones de rectificado.

Desde el punto de vista funcional, los resultados adquieren relevancia al considerar las condiciones reales de operación de los molinos trituradores. Las deformaciones superficiales presentes en las masas de molienda, tales como hundimientos, desgaste irregular, despicados y entalladuras, generan alteraciones geométricas que afectan directamente la eficiencia del proceso de trituración. La posibilidad de restaurar el paralelismo y la geometría cilíndrica de los rodillos mediante rectificado portátil representa una ventaja significativa, ya que contribuye a mantener uniformidad granulométrica, disminuir contaminantes en el material procesado y mejorar la calidad final del adobe producido.

Adicionalmente, los cálculos asociados a potencia requerida, tasas de remoción de material y comportamiento estructural sugieren que el equipo posee la capacidad técnica necesaria para realizar operaciones de mecanizado con niveles adecuados de estabilidad. Sin embargo, aunque los análisis computacionales proporcionan un alto nivel de confiabilidad respecto al desempeño estático del sistema, deben considerarse variables dinámicas que podrían modificar el comportamiento real del equipo. Fenómenos como vibraciones autoexcitadas, variaciones en la profundidad efectiva de corte, desgaste progresivo de la herramienta abrasiva y condiciones irregulares de contacto podrían influir sobre la rugosidad superficial alcanzada y la precisión dimensional obtenida durante la operación.

Desde una perspectiva económica y productiva, la propuesta presenta ventajas relevantes al reducir la dependencia de servicios externos especializados y minimizar tiempos asociados al desmontaje, transporte y reinstalación de componentes. Esta capacidad de intervención directa puede traducirse en incrementos de disponibilidad operacional y reducción de costos indirectos derivados de paradas prolongadas de producción, generando beneficios particularmente importantes para pequeñas y medianas empresas dedicadas a la producción de materiales cerámicos y construcción sostenible.

No obstante, el alcance de la investigación presenta limitaciones que deben ser consideradas. La validación desarrollada se fundamentó principalmente en modelos computacionales bajo condiciones controladas y supuestos definidos durante la etapa de diseño. Por esta razón, futuras investigaciones deberían orientarse hacia la fabricación de prototipos funcionales y la realización de pruebas experimentales que permitan contrastar los resultados simulados con condiciones reales de operación. Variables adicionales como vibraciones, calidad superficial obtenida, comportamiento dinámico, desgaste de componentes y repetibilidad del proceso representan aspectos fundamentales para consolidar la madurez tecnológica de la propuesta.

El proyecto demuestra cómo la integración de metodologías de diseño mecánico, simulación numérica y herramientas CAD/CAE permite desarrollar soluciones especializadas orientadas a necesidades reales de la industria nacional. Más allá del diseño de un equipo específico, la investigación aporta una metodología de desarrollo aplicable a futuras soluciones portátiles de mantenimiento industrial, fortaleciendo la capacidad tecnológica y la competitividad del sector productivo asociado a la fabricación de materiales de construcción sostenibles.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

1. Se logró desarrollar el diseño de una máquina rectificadora portátil especializada para el mantenimiento de masas de molinos trituradores de arcilla, constituyendo una solución técnicamente viable frente a los métodos convencionales que requieren desmontaje y traslado de componentes hacia talleres especializados. La propuesta permite ejecutar procesos de mantenimiento directamente en sitio, reduciendo tiempos de intervención, costos operativos y pérdidas asociadas a paradas prolongadas de producción.

2. La integración de metodologías de diseño mecánico, herramientas CAD y criterios de ingeniería permitió desarrollar un sistema funcional compuesto por estructura portante, mecanismos de guiado lineal, sistemas de transmisión y mecanismos de avance, logrando un equilibrio adecuado entre portabilidad, estabilidad estructural y precisión operacional para aplicaciones industriales reales.

3. La evaluación de las propiedades físicas del modelo CAD permitió verificar que la máquina diseñada posee una masa total de 148,86 kg, cumpliendo con el requerimiento de diseño de mantener el peso por debajo de 150 kg. Este resultado confirma que la solución desarrollada satisface las restricciones de portabilidad planteadas desde la fase conceptual, favoreciendo su transporte, manipulación e instalación en entornos industriales. Además, el cumplimiento de este criterio evidencia un adecuado equilibrio entre resistencia estructural, funcionalidad y peso total del equipo.

4. La aplicación de simulaciones mediante análisis por elementos finitos permitió validar el comportamiento mecánico del diseño y optimizar progresivamente la configuración estructural. Los resultados obtenidos demostraron que las tensiones generadas durante la operación permanecen por debajo de los límites admisibles de los materiales utilizados, garantizando la capacidad estructural necesaria para soportar las cargas de trabajo sin comprometer la integridad del sistema.

5. El proceso iterativo de optimización estructural permitió reducir los desplazamientos máximos desde 0,271 mm hasta 0,163 mm y disminuir los esfuerzos máximos de Von Mises de 43,25 MPa a 33,72 MPa, evidenciando mejoras significativas en rigidez, estabilidad y precisión geométrica. Estas optimizaciones fortalecen la capacidad del equipo para mantener tolerancias cercanas a $\pm 0,1$ mm durante el proceso de rectificado.

6. La implementación del equipo propuesto permite intervenir defectos superficiales críticos presentes en las masas de molienda, como hundimientos, despicados y entallados, restaurando las condiciones geométricas requeridas para garantizar uniformidad en el proceso de trituración. Esto contribuye a disminuir concentraciones de esfuerzos, mejorar la resistencia a fatiga de los componentes y aumentar la vida útil de los elementos sometidos a desgaste.

7. Desde la perspectiva productiva y económica, la máquina desarrollada representa una alternativa que puede incrementar la disponibilidad operativa de los molinos trituradores al reducir costos asociados a desmontaje, transporte y contratación de servicios externos. Esto genera beneficios directos sobre la continuidad operacional, la competitividad empresarial y la eficiencia de los procesos de mantenimiento industrial.

8. Finalmente, el proyecto demuestra la capacidad de aplicar principios de mecánica industrial, simulación numérica y diseño asistido por computador para resolver problemáticas reales de la industria del adobe. Además, establece una base técnica sólida para futuras etapas de fabricación, validación experimental y transferencia tecnológica, contribuyendo al fortalecimiento tecnológico, económico y sostenible del sector productivo.

6.2. Recomendaciones

1. Se recomienda avanzar hacia la etapa de fabricación del prototipo funcional de la máquina rectificadora portátil, con el fin de validar físicamente los resultados obtenidos durante las fases de diseño y simulación. La construcción del equipo permitirá verificar el desempeño real de los componentes mecánicos, la facilidad de ensamblaje y las condiciones operativas previstas en el desarrollo del proyecto.

2. Realizar pruebas experimentales en condiciones reales de trabajo sobre masas de molinos trituradores de arcilla, evaluando parámetros como precisión de rectificado, estabilidad estructural, calidad superficial obtenida y capacidad de remoción de material. Estas pruebas permitirán contrastar los resultados experimentales con las predicciones obtenidas mediante simulación numérica.

3. Implementar un plan de instrumentación durante la fase de pruebas, incorporando equipos de medición que permitan registrar desplazamientos, vibraciones, esfuerzos y tolerancias dimensionales. La información obtenida servirá para validar los criterios de diseño y realizar ajustes que optimicen el comportamiento del sistema.

4. Desarrollar procedimientos estandarizados de operación, montaje y mantenimiento de la máquina, con el propósito de garantizar condiciones seguras de uso y facilitar su implementación en entornos industriales. La documentación técnica deberá incluir manuales de operación, mantenimiento preventivo y protocolos de inspección.

5. Evaluar el desempeño de diferentes materiales y tratamientos superficiales en los componentes sometidos a desgaste, especialmente en los sistemas de guiado, transmisión y contacto con el proceso de rectificado, buscando incrementar la durabilidad y confiabilidad del equipo.

6. Realizar un análisis económico detallado que incluya costos de fabricación, operación y mantenimiento, así como el retorno de la inversión asociado a la reducción de tiempos muertos y costos de intervención de los molinos. Esto permitirá cuantificar los beneficios económicos potenciales para las empresas del sector.

7. Considerar futuras mejoras orientadas a la automatización de los movimientos de avance y posicionamiento, mediante la incorporación de sistemas electromecánicos o de control numérico, con el objetivo de aumentar la precisión, repetibilidad y

productividad del proceso de rectificado.

8. Promover la transferencia tecnológica y la implementación piloto del equipo en empresas dedicadas a la producción de adobe y materiales cerámicos, con el fin de obtener retroalimentación de usuarios finales, identificar oportunidades de mejora y facilitar la adopción industrial de la tecnología desarrollada.

Bibliografía

Akao, Y. (2004). *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design*. Productivity Press.

ANSYS Inc. (2026). What is cae and fea?

Autodesk (2026). Autodesk inventor.

Brook, J. (2025). The cost of downtime in manufacturing.

Budynas, R. G. and Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill, 10 edition.

Dassault Systèmes (2026a). Catia: Software de diseño e ingeniería 3d. Consultado en marzo de 2026.

Dassault Systèmes (2026b). Solidworks: Software de diseño cad 3d. Consultado el 30 de marzo de 2026.

Department of Building and Real Estate, PolyU (2021). Data mining and statistical analysis of construction equipment failure. In *Proceedings of the 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Hong Kong. IAARC.

El-Hofy, H. A.-G. (2014). *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2 edition.

Global Market Insights (2025). Sustainable construction materials market.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., and Baptista Lucio, M. d. P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Interamericana, México, 6 edition.

Hurtado de Barrera, J. (2012). *Metodología de la investigación: Guía para la comprensión holística de la ciencia*. Ediciones Quirón; Ciea-Sypal, 4 edition.

Illampa, R., I., I., and Charmpis, D. (2009). Adobe: An environmentally friendly construction material. In *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, volume 120, pages 253–262. WIT Press.

Immerman, G. (2025). The real cost of downtime in manufacturing.

International Organization for Standardization (1998). Geometrical product specification (gps) — surface imperfections — terms, definitions and parameters. Technical Report ISO 8785:1998, ISO.

International Organization for Standardization (2017). Geometrical product specifications (gps) — geometrical tolerancing — tolerances of form, orientation, location and run-out.

International Organization for Standardization (2021). Geometrical product specifications (gps) — surface texture: Profile — part 1: Indication of surface texture.

Kulkarni, M. (2024). Precision grinding: All you need to know.

Kulkarni, Y. (2025). Sustainable construction materials market. Technical report, Precedence Research.

Laura (2024). Rod mill maintenance.

Lie, J. (s.f.). Precision grinding: The ultimate guide.

Naciones Unidas (2021). Desarrollo rural: Plataforma de conocimiento sobre desarrollo sostenible.

Norton Abrasives (s.f.). Catálogo de muelas abrasivas norton. Consultado el 30 de marzo de 2026.

Peraza Góngora, J. M. (2022). *Caracterización de adobes experimentales: Efecto de la adición de aditivos poliméricos en sus propiedades mecánicas*. Tesis doctoral, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Mérida, Yucatán, México.

Ramírez Revilla, A. (2020). Análisis de desgaste de los parámetros de rodadura en metros pesados. Trabajo de fin de máster, Universidad Pontificia Comillas.

Richconn (2024). Precision grinding: The ultimate guide.

Rivera-Salcedo, H. and M. G. B. J., O. (2021). Adobe como saber ancestral usado en construcciones autóctonas de pore y nunchía, casanare (colombia). *Revista de Arquitectura de Bogotá*, 2.

Seaborn Manufacturing (2025). Typical manufacturing tolerances and finishes for various processes.

Shibang Machinery (s.f.). Essential maintenance and repair guide for your grinding mill machine.

Siemens Digital Industries Software (2026). Software nx cad/cam. Consultado en marzo de 2026.

Stafford, S. (2025). The true cost of downtime in manufacturing.

Superior Plant Services (s.f.). Advantages of portable machining.

Tee (2024). Surface grinding: The ultimate guide.

United Grinding (2020). The value of preventive maintenance for grinding machines.

Universidad de Córdoba (2020). *Manual de ingeniería de fabricación: Arranque de viruta*. Universidad de Córdoba.

Wang, L., Yang, L., Wang, L., Tang, X., and Liu, G. (2024). Influence mechanism of grinding surface quality of 20crmnti steel on contact failure. *Scientific Reports*, 14(1):13374.

Zenith, M. (2025). Grinding cracks: Key defect in steel quality control and testing.

Apendice

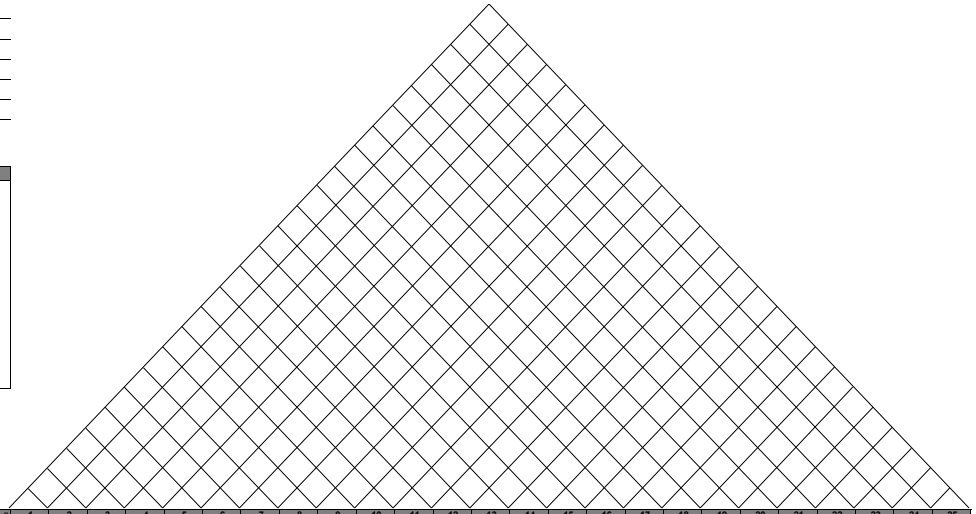
Title: Molinos Trituradores de la Industria del Adobe

Author: Heiner Mateo Torres Martínez

Date:

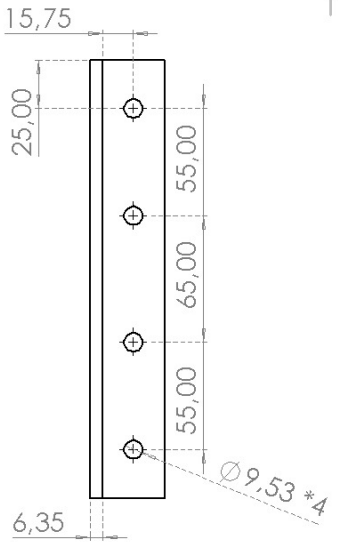
Notes:

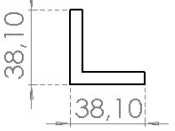
Legend		
⊙	Strong Relationship	9
O	Moderate Relationship	3
▲	Weak Relationship	1
++	Strong Positive Correlation	
+	Positive Correlation	
−	Negative Correlation	
▼	Strong Negative Correlation	
▼	Objective Is To Minimize	
▲	Objective Is To Maximize	
X	Objective Is To Hit Target	

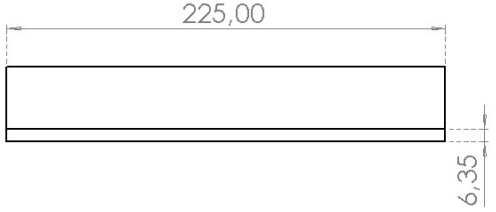


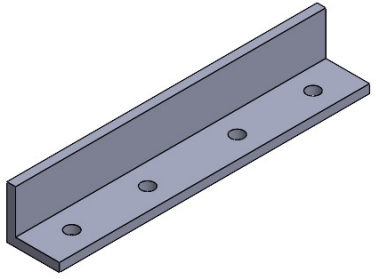
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") / Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	1 Masa total del equipo (kg)	2 Dimensiones generales (mm)	3 Velocidad tangencial de rectificado (m/s)	4 Velocidad de avance (mm/min)	5 Rugosidad superficial obtenida (µm)	6 Rigidez estructural del basidor (N/mm)	7 Nivel de vibración (mm/s RMS)	8 Potencia del motor (kW)	9 Tipo de sistema de guiado	10 Precisión de posicionamiento (mm)	11 Material estructural	12 Resistencia al desgaste (HRC)	13 Sistema de protección contra polvo (IP / sellado)	14 Nivel de ruido (dB)	15 Ergonomía de operación (Altura / accesibilidad)	16 Tipo de sistema de sujeción (Mecánico / hidráulico)	17 Consumo energético (kWh)	18 Facilidad de mantenimiento (Tiempo MTTR)	19 Vida útil estimada (horas)	20 Factor de seguridad estructural (FS)	21	22	23	24	25	Competitive Analysis (0=Worst, 5=Best) Our Company	Competitor 1	Competitor 2	Competitor 3	Competitor 4	Competitor 5
				Direction of Improvement Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)	▼	▼	▲	x	▼	▲	▼	x	x	▲	x	▲	x	▼	▲	x	▼	▼	▲	x												
1	9	10.9	5.0	El equipo debe ser portátil	⊙	⊙																													
2	9	10.9	5.0	Fácil de transportar	⊙	⊙																													
3	3	10.9	5.0	Alta precisión de rectificado		▲	O		O																										
4	3	10.9	5.0	Excelente acabado superficial		▲	O	O																											
5	3	8.7	4.0	Operación sencilla			O													O															
6	3	4.3	2.0	Bajo nivel de vibración	O	O	▲			O																									
7	3	10.9	5.0	Alta estabilidad durante trabajo	O	O	▲				O																								
8	3	8.7	4.0	Alta durabilidad						O					O								O	O											
9	3	6.5	3.0	Bajo consumo energético	▲	▲						O									O														
10	9	8.7	4.0	Adaptabilidad a diferentes piezas									O	O					O				⊙												
11	3	4.3	2.0	Bajo nivel de ruido														O																	
12	9	4.3	2.0	Resistencia al polvo y abrasión												⊙	O																		
13																																			
14																																			
15																																			
16																																			
17																																			
18																																			
19																																			
20																																			
21																																			
22																																			
23																																			
24																																			
25																																			
				Target or Limit Value	≤ 150 kg	≤ 1 200 × 800 × 1 400 mm	25 – 35 m/s	00 – 350 mm/min	Ra ≤ 0,8 µm	≥ 1800 N/mm	≤ 2,5 mm/s	1,5 – 7 kW	Guías lineales de precisión	±0,01 mm	ASTM A36 / AISI 1020	≥ 50 HRC	IP54 mínimo	≤ 85 dB	Altura de trabajo 900–1100 mm		≤ 2,5 kWh	≤ 20 min	≥ 10 000 h	FS ≥ 2											
				Difficulty (0=Easy to Accompliish, 10=Extremely Difficult)	10	7	3	5	3	7	6	8	1	3	1	5	8	7	5	5	7	8	7	5											
				Max Relationship Value in Column	9	9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	9	3	3	3	3	3	9	3	3											
				Weight / Importance	247.8	269.6	106.5	32.6	32.6	39.1	32.6	19.6	26.1	26.1	26.1	39.1	13.0	13.0	26.1	26.1	19.6	78.3	26.1	26.1											
				Relative Weight	22.0	23.9	9.5	2.9	2.9	3.5	2.9	1.7	2.3	2.3	2.3	3.5	1.2	1.2	2.3	2.3	1.7	6.9	2.3	2.3											

Powered by QFD Online (http://www.QFDOnline.com)

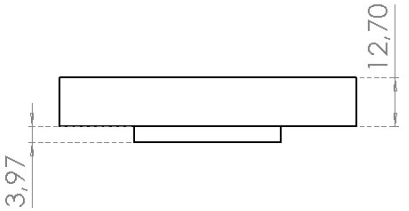


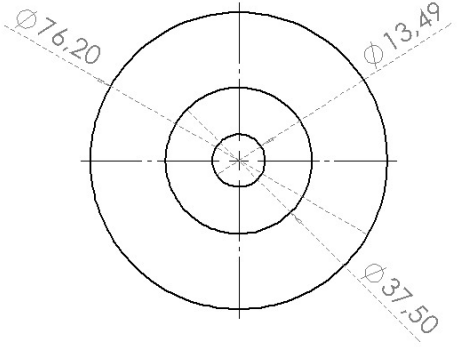


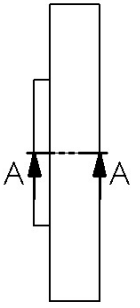


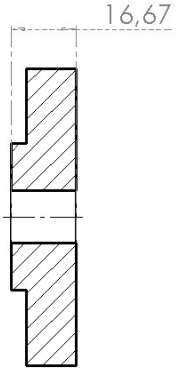


Pieza: Angulo refuerzo de platina de soporte del carro transversal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1020	Nº DE DIBUJO: 1	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institucion d'Ensenyanza Pascual Bravo					

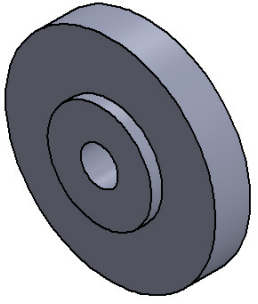




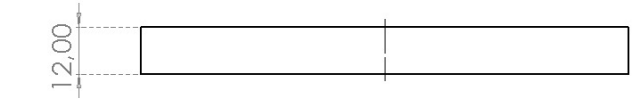


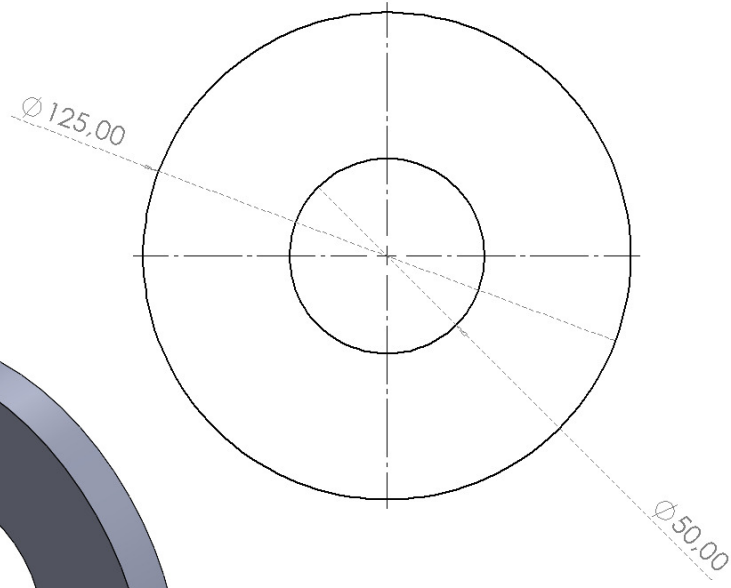


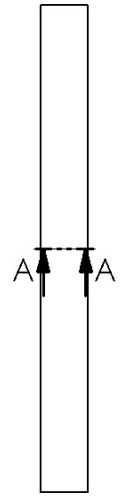
SECCIÓN A-A



Pieza: Arandela para barras tapas laterales carro longitudinal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata			MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 3	A3
Institucion					
INSTITUCION UNIVERSITARIA Pascual Bravo			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

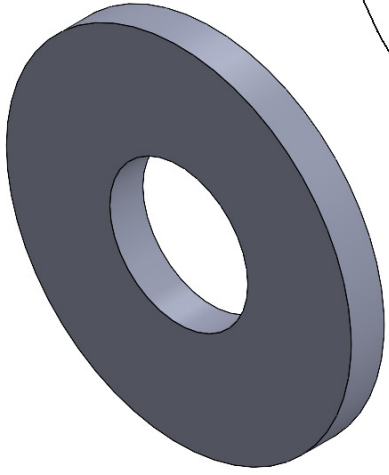




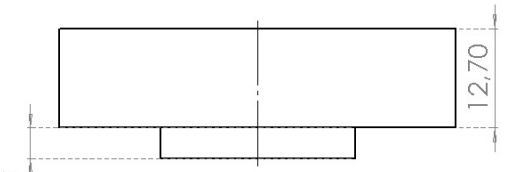


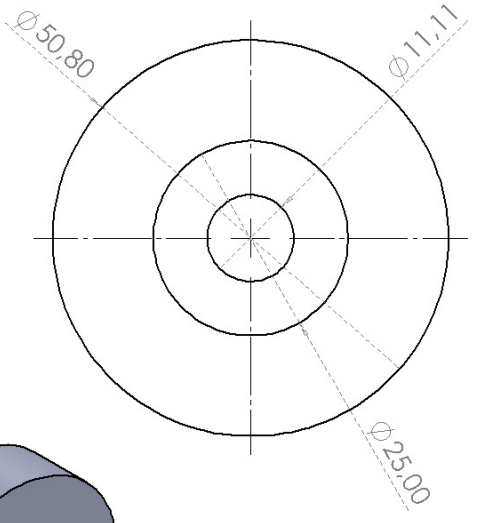


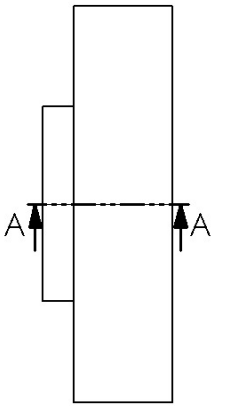
SECCIÓN A-A

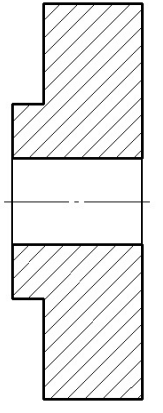


	Pieza: Arandela trasera para piedra	Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	
			SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm	
	NOMBRE	FECHA			
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28/05/2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28/05/2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28/05/2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	TÍTULO: Retificador de Masas		
Institucion					
Institución Universitaria Pascual Bravo		PESO:	Nº DE DIBUJO: 4		A3
			ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	



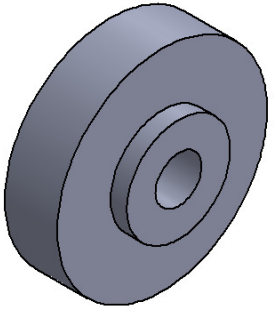




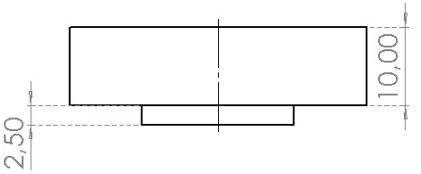


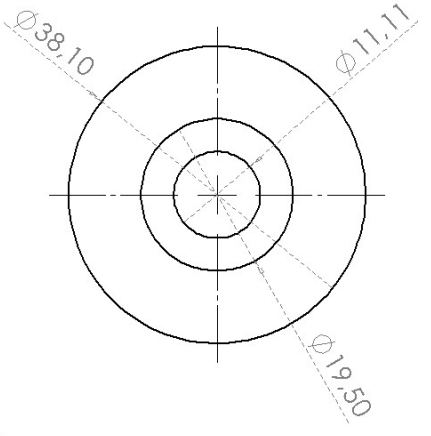
SECCIÓN A-A

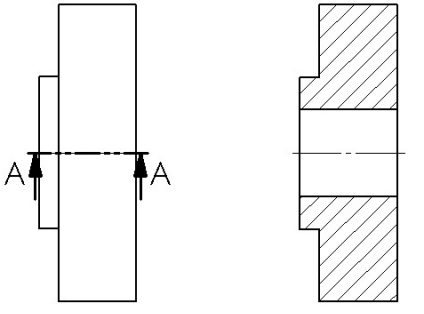
ESCALA 2 : 1



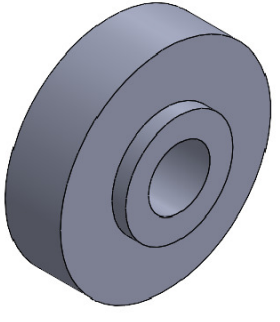
Pieza: Arandelas para barras tapas laterales carro transversal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
REVIS.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata	MATERIAL: Acero 1045		Nº DE DIBUJO: 5	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion		PESO:		ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1
Institucion Universitaria Pascual Bravo					







SECCIÓN A-A

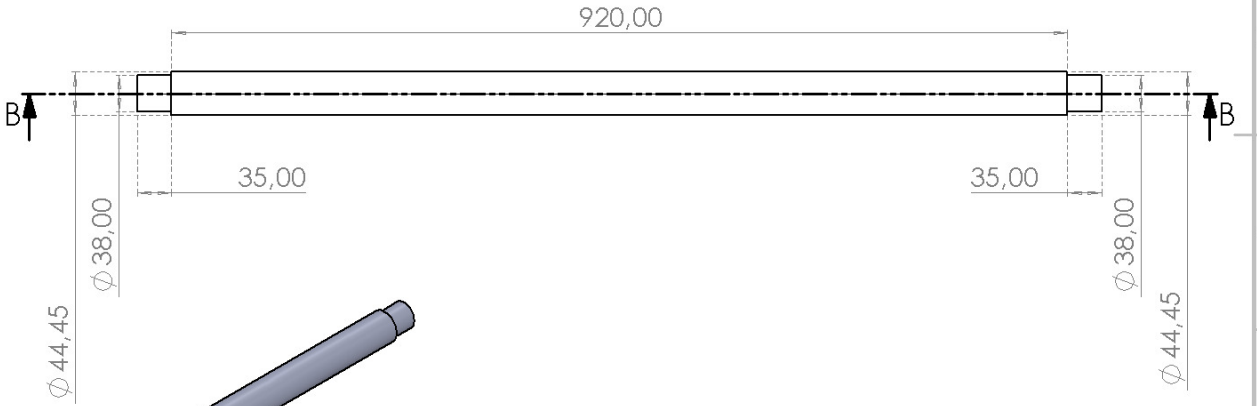


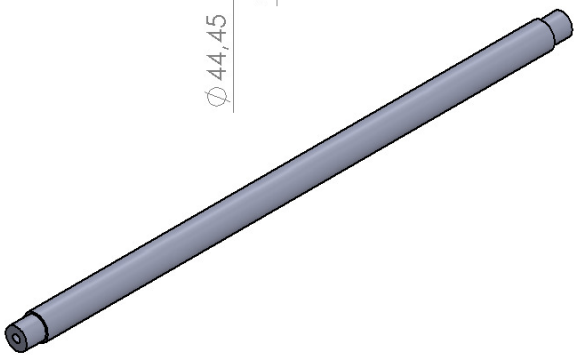
Pieza: Arandelas para separadores de tapas laterales			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata			MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 6	A3
Institucion					
Institucion Universitaria Pascual Bravo			PESO:	ESCALA 2:1	HOJA 1 DE 1



SECCIÓN B-B

ESCALA 1 : 4



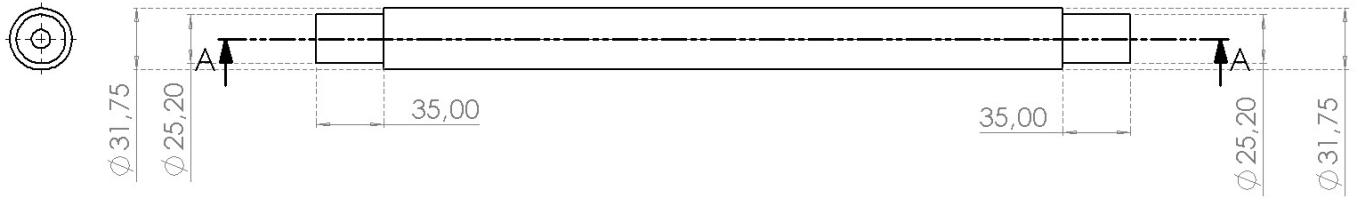


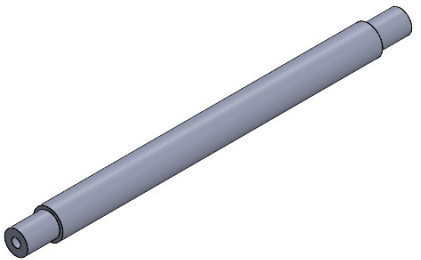
Pieza: Barra Guia carro longitudinal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 7	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					



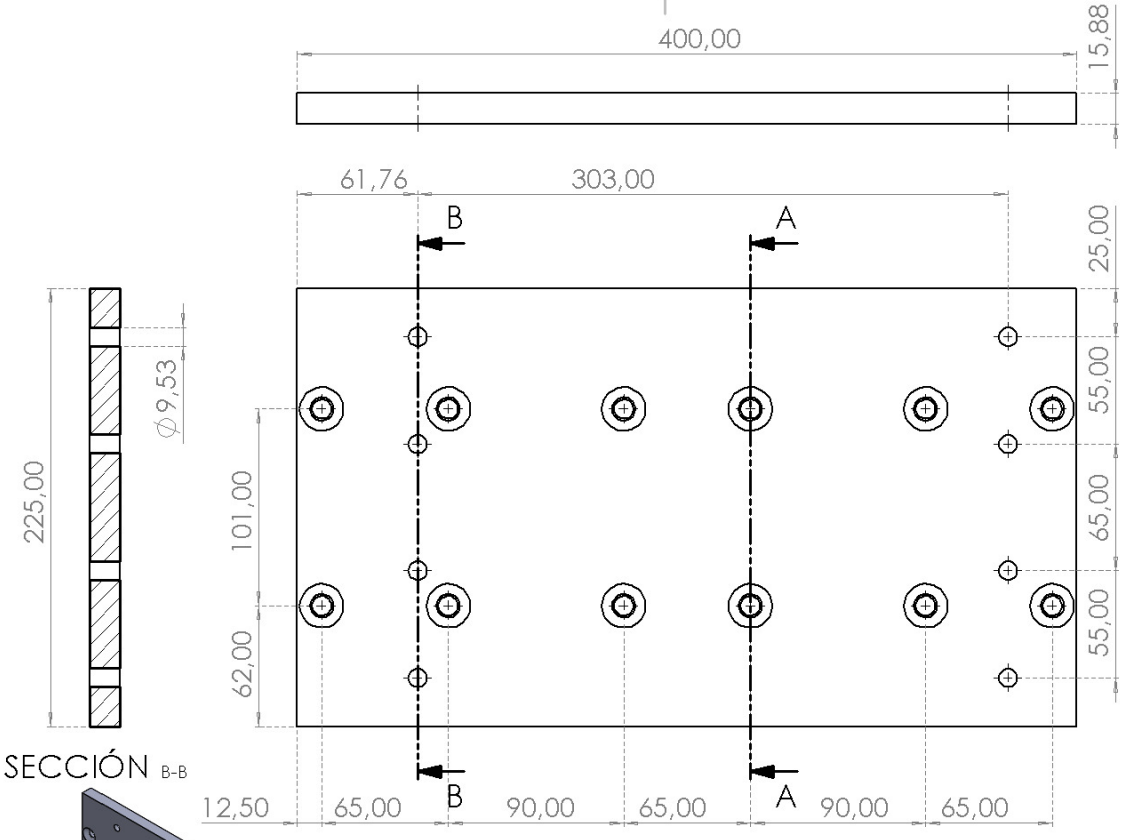
SECCIÓN A-A

ESCALA 1 : 2



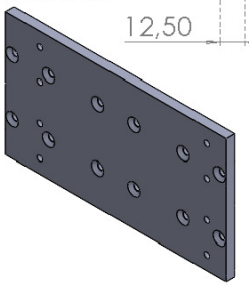


Pieza: Barra guia carro transversal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28/05/2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28/05/2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28/05/2025			
PROB.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata			MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 8	A3
Institucion					
Institucion universitaria Pascual Bravo			PESO:	ESCALA:3:5	HOJA 1 DE 1

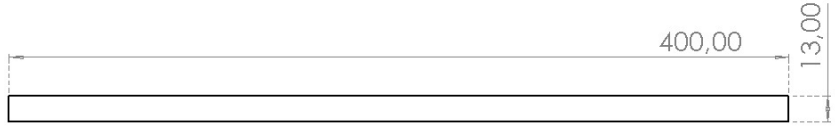


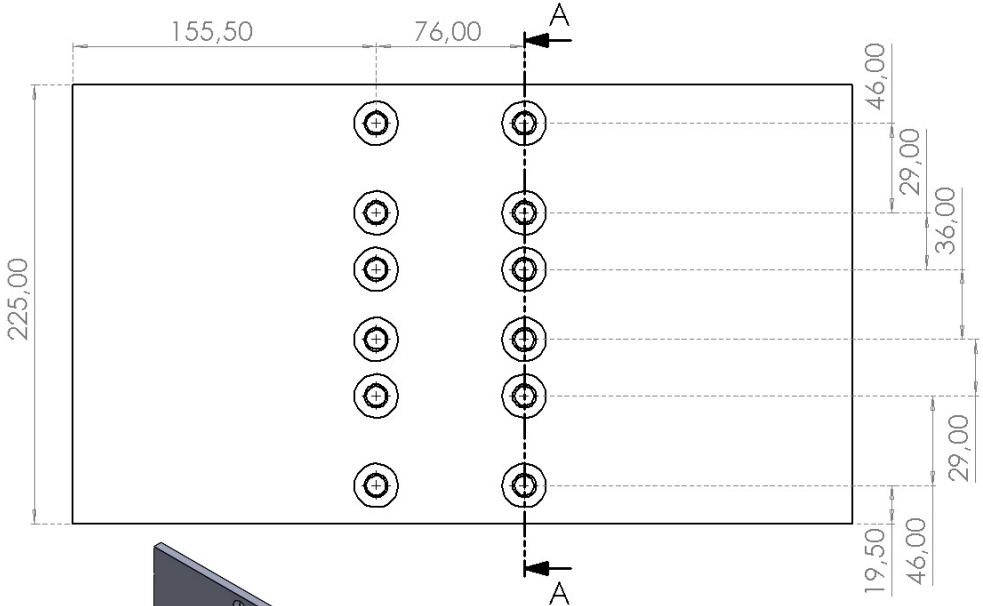
SECCIÓN B-B

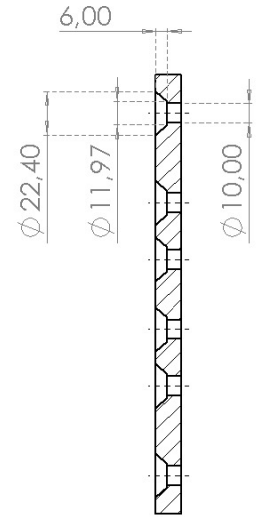
SECCIÓN A-A



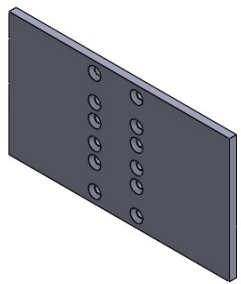
Pieza: Base de carro longitudinal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
REVIS.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALIF.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO: 9	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					



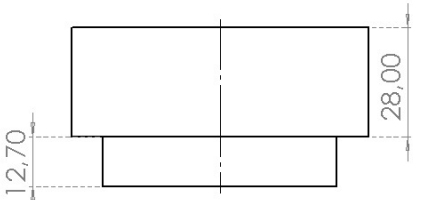


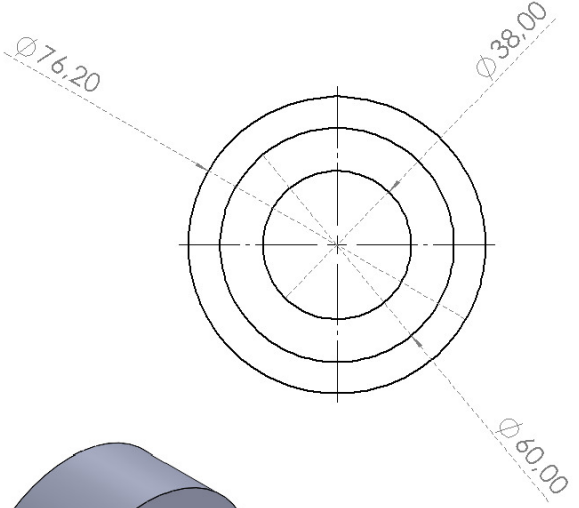


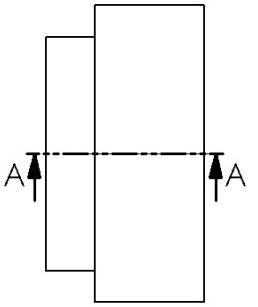
SECCIÓN A-A

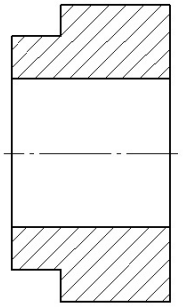


Pieza: Base inferior carro transversal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez		28 / 05 / 2025		
	Valeria Arboleda Castañeda		28 / 05 / 2025		
	Luis Ernesto Cano Sepulveda		28 / 05 / 2025		
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata				MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO: 10 — A3
Institucion					
Institución Universitaria Pascual Bravo				PESO:	ESCALA:1:2 — HOJA 1 DE 1

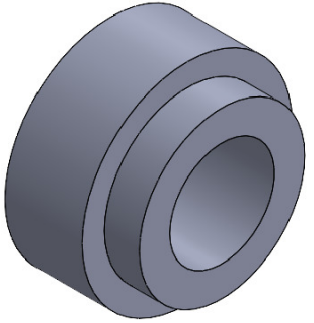




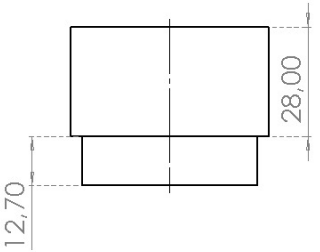


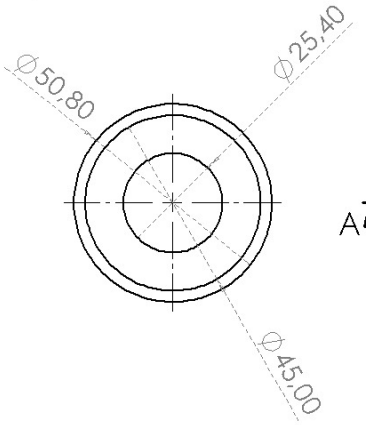


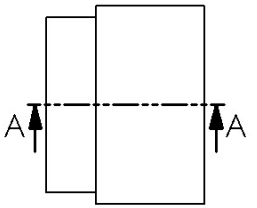
SECCIÓN A-A

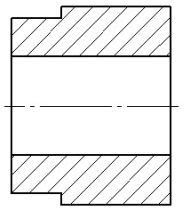


Pieza: Buje para apoyo de la tapa lateral del carro longitudinal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	26 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	26 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	26 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 11	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

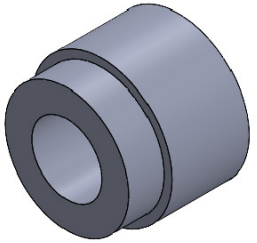




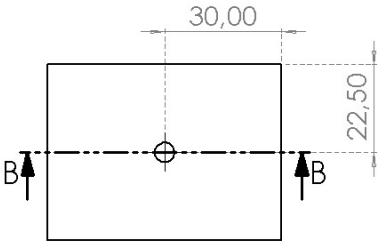


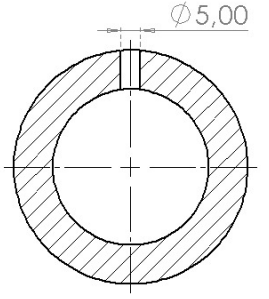


SECCIÓN A-A

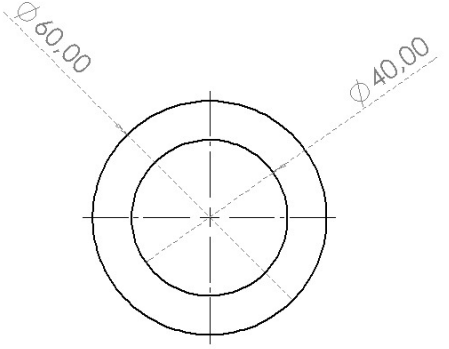


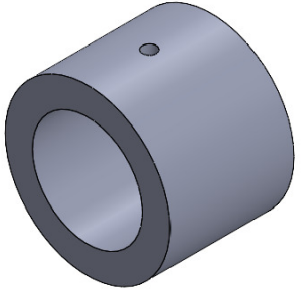
Pieza: Buje para apoyo de los soportes de carro longitudinal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	26 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	26 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	26 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO 12	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institucion Universitaria Pascual Bravo					



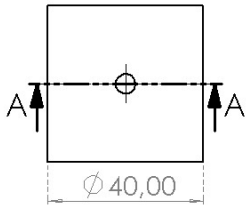


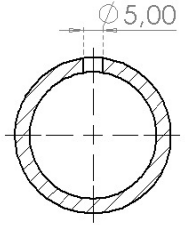
SECCIÓN B-B



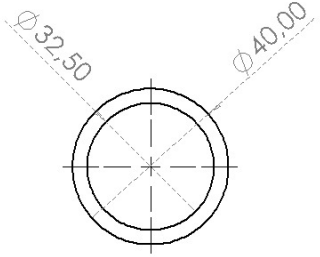


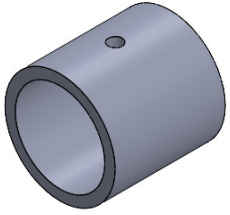
Pieza: Casquillo buje barras carro longitudinal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	26 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	26 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	26 / 05 / 2025			
REVIS.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALIF.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Bronce SEA-65	N.º DE DIBUJO: 13	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					



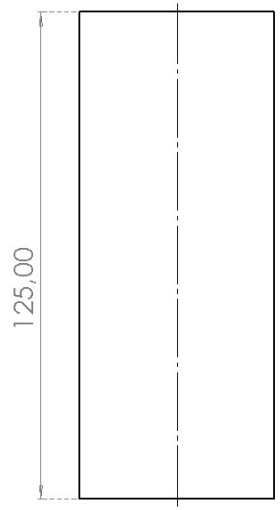


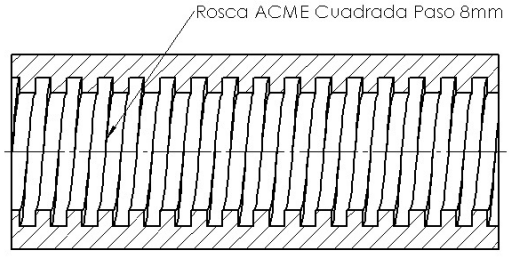
SECCIÓN A-A





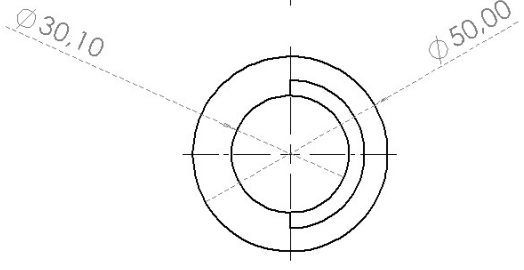
Pieza: Casquillo buje barras carro transversal			Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28/05/2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28/05/2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28/05/2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Bronce SAE-65	Nº DE DIBUJO: 14	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

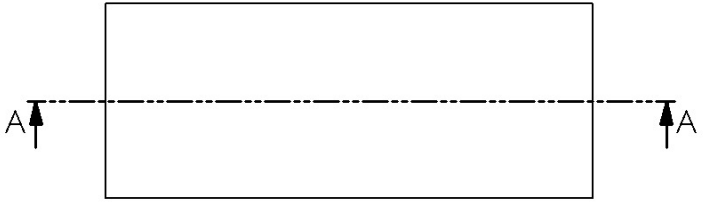


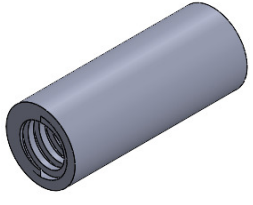


SECCIÓN A-A

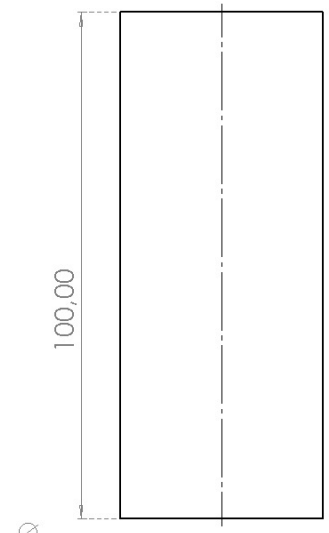
ESCALA 1 : 1

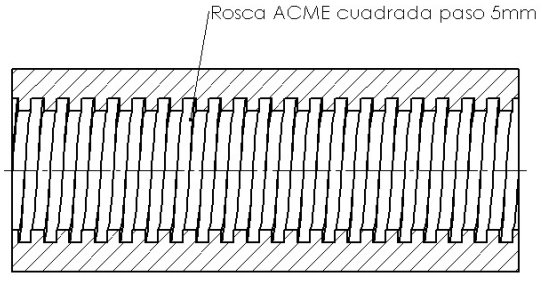






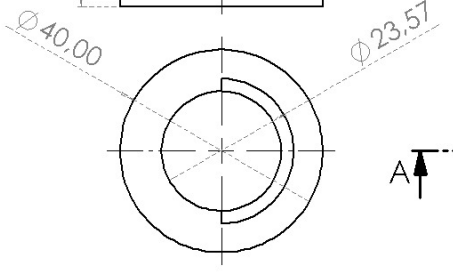
Pieza: Casquillo buje tuerca tornillo carro longitudinal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28/05/2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28/05/2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28/05/2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Bronce SAE-65	Nº DE DIBUJO: 15	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

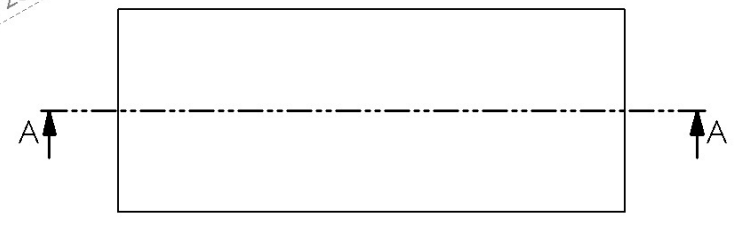




SECCIÓN A-A

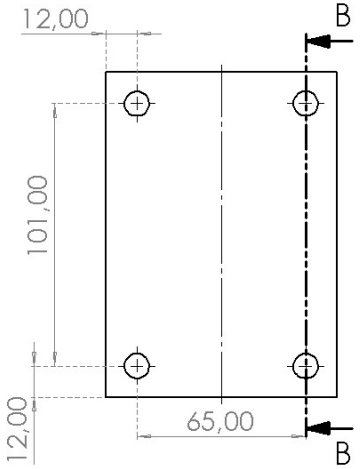
ESCALA 1.3 : 1

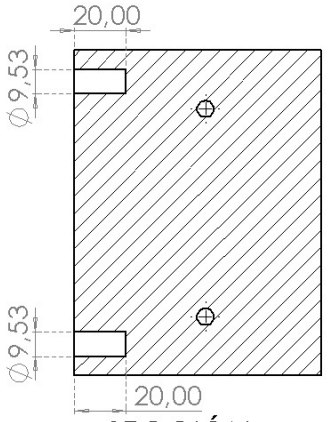






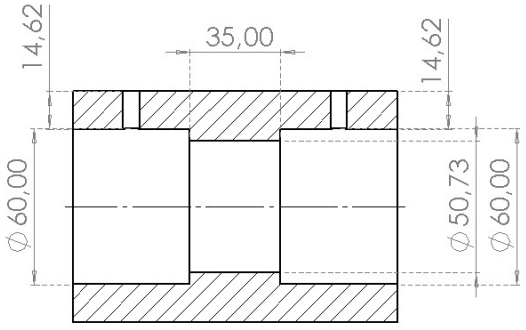
Pieza: Casquillo buje tuerca tornillo carro transversal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Bronce SEA-65	Nº DE DIBUJO 16	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion					
Institución Universitaria Pascual Bravo			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1





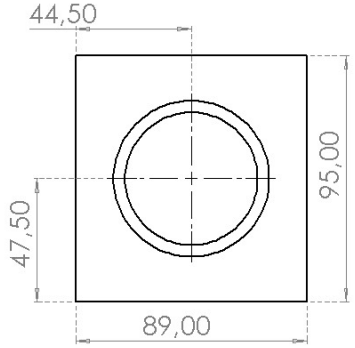
SECCIÓN B-B

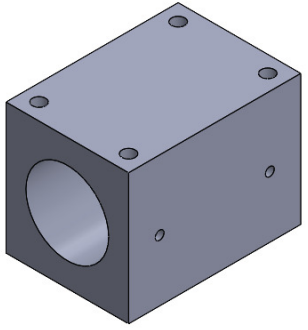
ESCALA 1 : 1.5

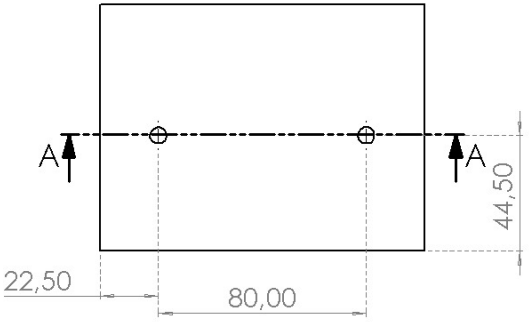


SECCIÓN A-A

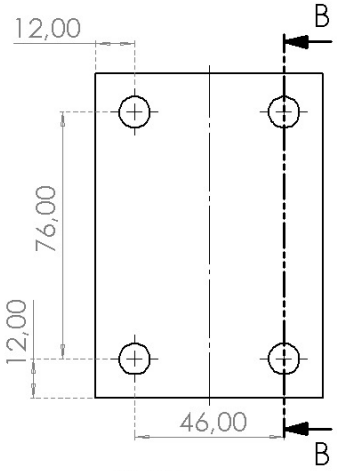
ESCALA 1 : 1.5

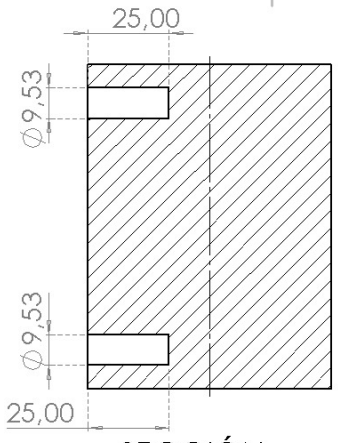






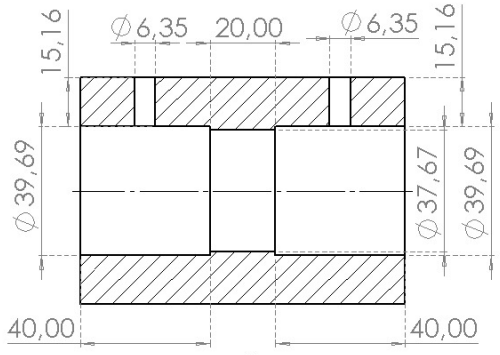
Pieza: Cuerpo buje barras carro longitudinal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Fundicion Gris	Nº DE DIBUJO 17	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





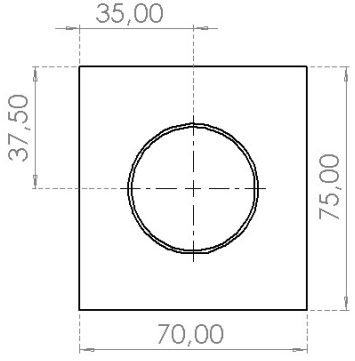
SECCIÓN B-B

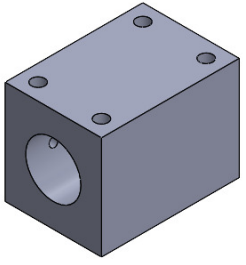
ESCALA 1 : 1.2

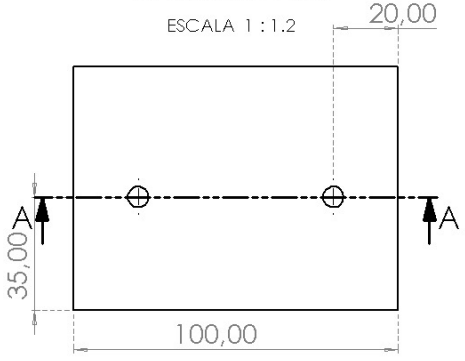


SECCIÓN A-A

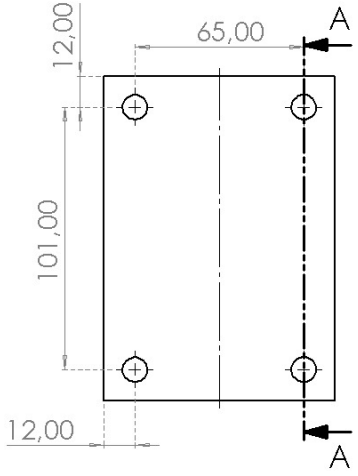
ESCALA 1 : 1.2

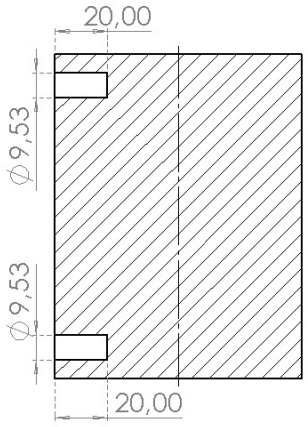






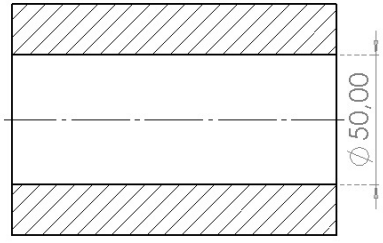
Pieza: Cuerpo buje barras carro transversal		Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	
			SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm	
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO: Retificador de Masas		
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Fundicion Gris	Nº DE DIBUJO: 18	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





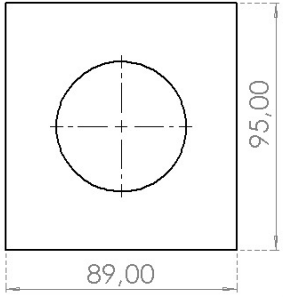
SECCIÓN A-A

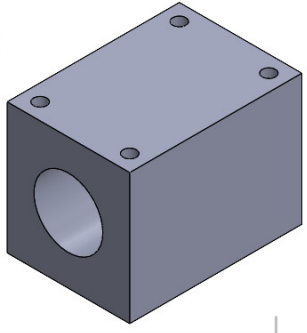
ESCALA 1 : 1.5



SECCIÓN B-B

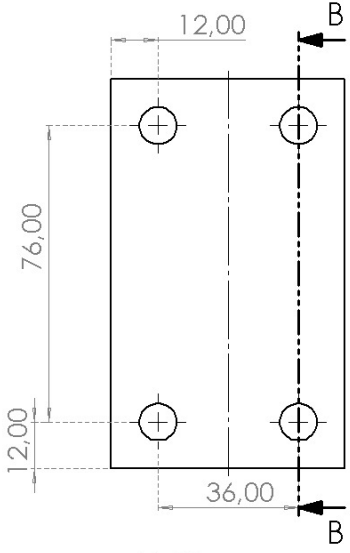
ESCALA 1 : 1.5

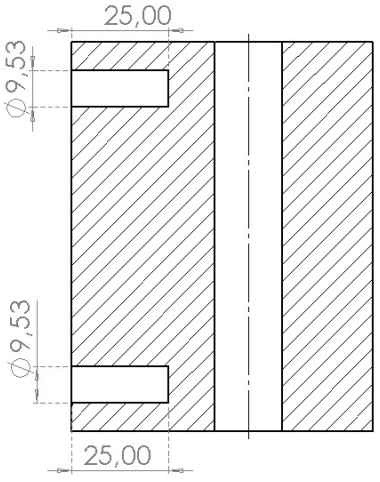






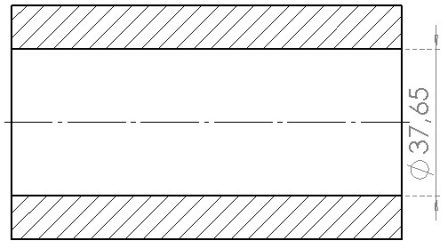
Pieza: Cuerpo tuerca tornillo carro longitudinal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Fundicion Gris	Nº DE DIBUJO 19	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





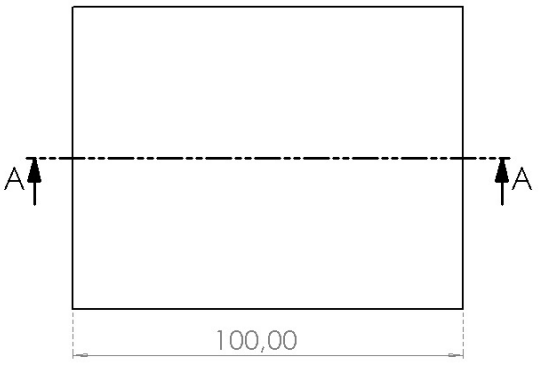
SECCIÓN B-B

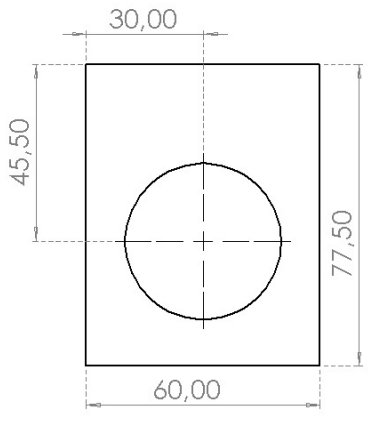
ESCALA 1 : 1

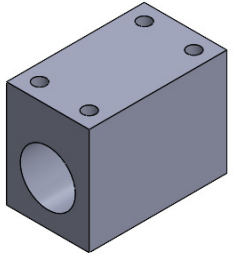


SECCIÓN A-A

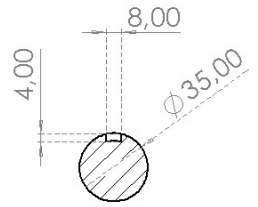
ESCALA 1 : 1





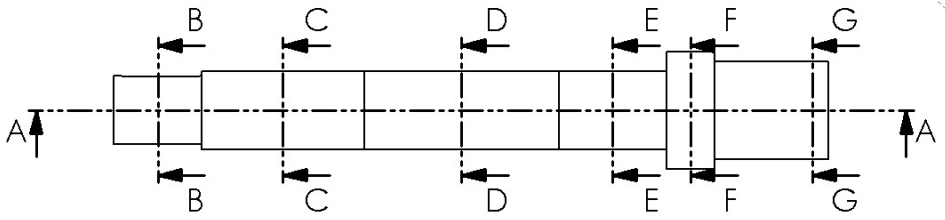


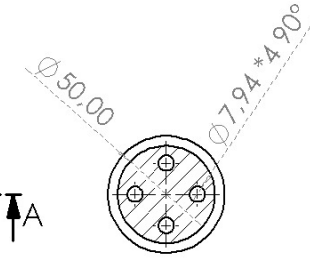
Pieza: Cuerpo tuerca tornillo carro transversal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Fundicion Gris	Nº DE DIBUJO 20	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					



SECCIÓN B-B

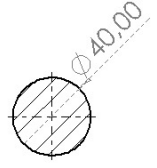
ESCALA 1 : 2





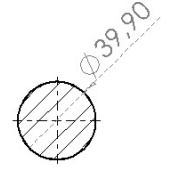
SECCIÓN G-G

ESCALA 1 : 2



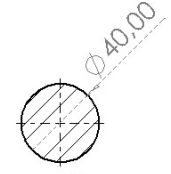
SECCIÓN C-C

ESCALA 1 : 2



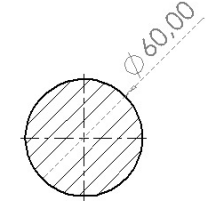
SECCIÓN D-D

ESCALA 1 : 2



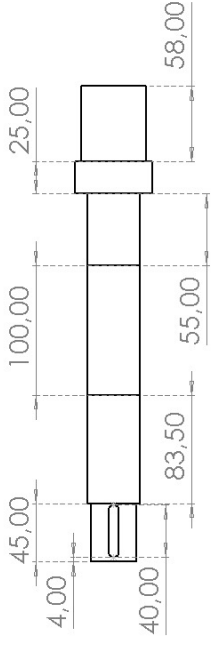
SECCIÓN E-E

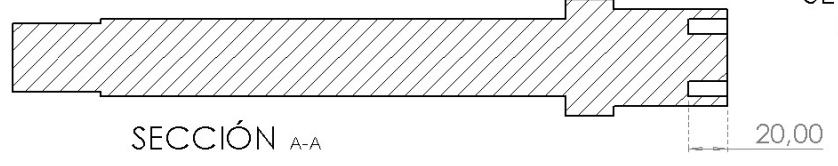
ESCALA 1 : 2



SECCIÓN F-F

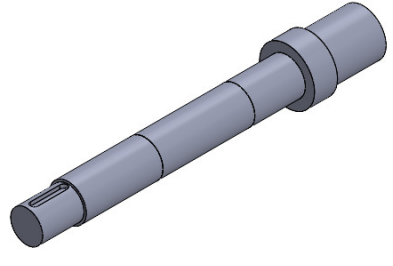
ESCALA 1 : 2



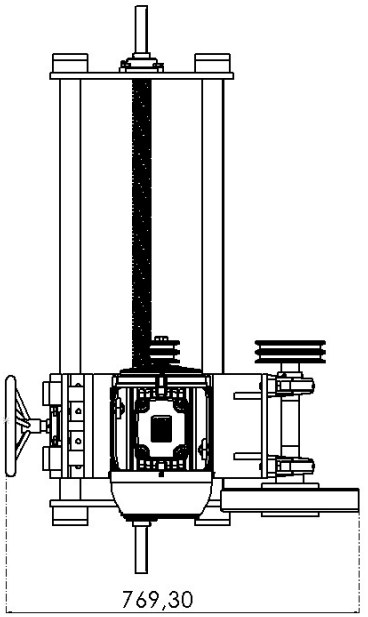


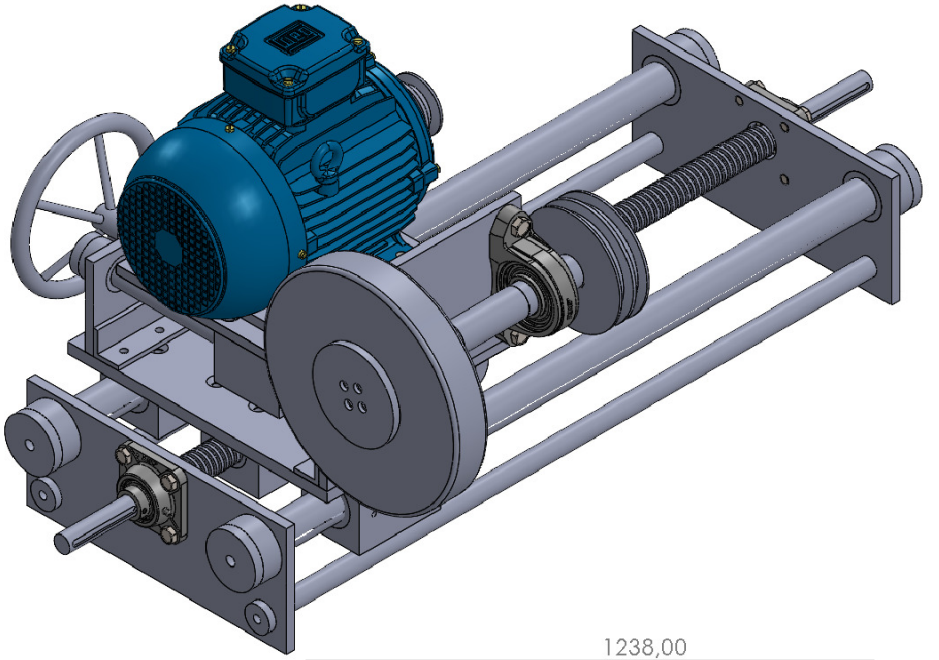
SECCIÓN A-A

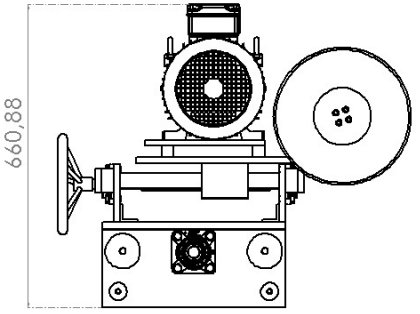
ESCALA 1 : 2

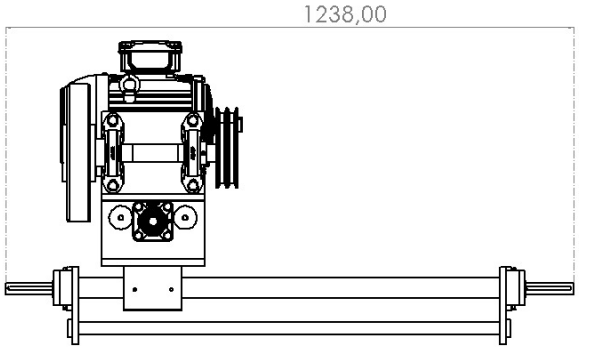


Pieza: Eje para la piedra			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 21	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

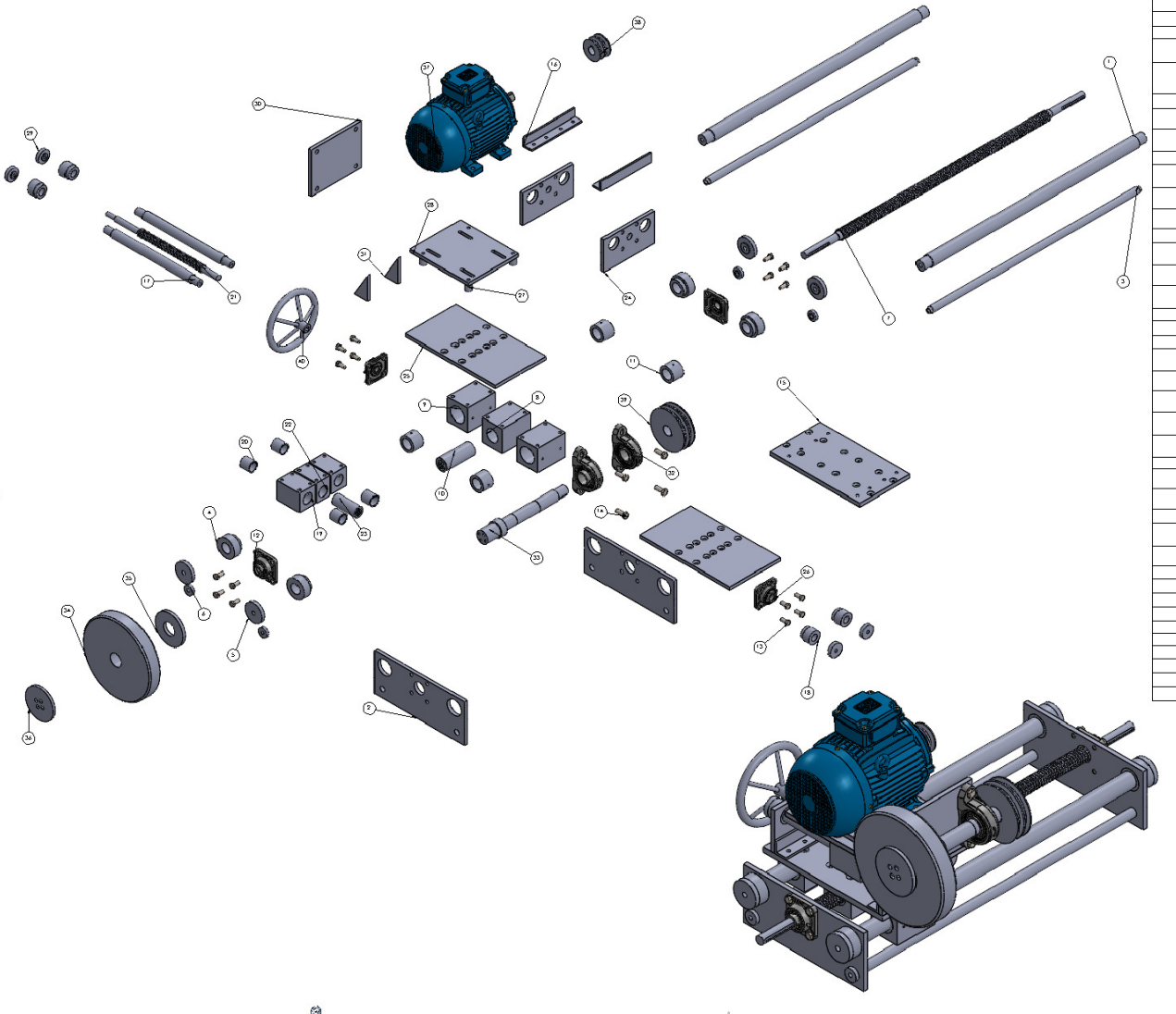






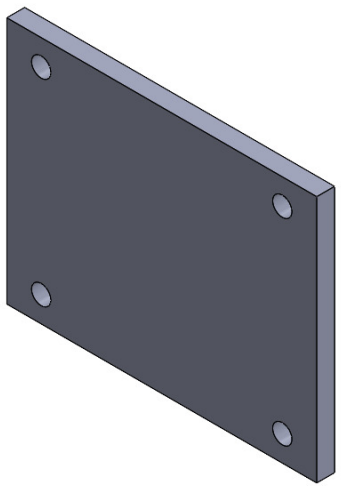


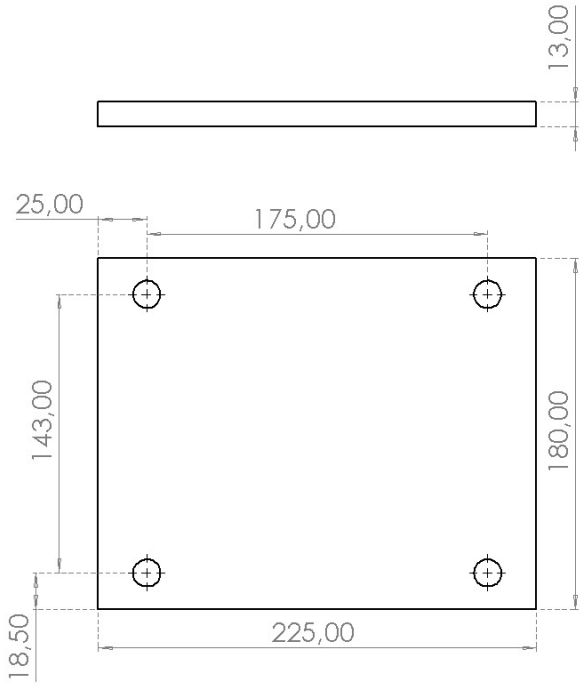
		5:1	mm
		Rectificador de masas	
		Varios	33



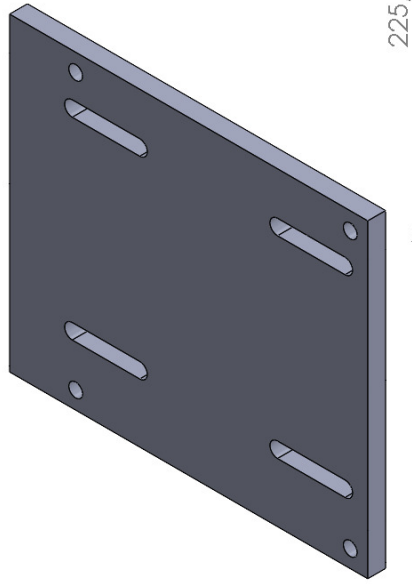
Nº DE ELEMENTO	Nº DE PIEZA	CANTIDAD
1	Barra guiadora carro longitudinal	2
2	Placa lateral para la estructura para carro longitudinal	2
3	Separador carro longitudinal	2
4	Rulo para apoyo de la placa lateral del carro longitudinal	4
5	Arandela para barra placas laterales carro longitudinal	4
6	Arandelas para separadores de placas laterales	4
7	Tornillo carro longitudinal	1
8	Cuerpo hembra tornillo carro longitudinal	1
9	Cuerpo rulo barras carro longitudinal	2
10	Casquillo rulo hembra tornillo carro longitudinal	1
11	Casquillo rulo barras carro longitudinal	4
12	Chumacera SKF PF 25 M4	2
13	B18.2.3.2M - Hornhead hex screw M12 x 1.75 x 25 -05M-N	16
14	B18.2.3.2M - Hornhead hex screw M14 x 2.0 x 35 -06M-N	4
15	Base de carro longitudinal	1
16	Angulo refuerzo placa soporte carro transversal	2
17	Barra guiadora carro transversal	2
18	Rulo para apoyo de los soportes de carro transversal	4
19	Cuerpo rulo barras carro transversal	2
20	Casquillo rulo barras carro transversal	4
21	Tornillo carro transversal	1
22	Cuerpo hembra tornillo carro transversal	1
23	Casquillo rulo hembra tornillo carro transversal	1
24	Soporte delantero para el carro transversal	2
25	Base inferior carro transversal	2
26	Chumacera SKF_IBC1 20A_M	2
27	soporte para base motor	4
28	Placa base motor	1
29	Arandelas para barras placas laterales carro transversal	4
30	Placa base chumacera	1
31	refuerzo placa base chumacera	2
32	SKF_SYK 40 TF	2
33	Eje para la polea	1
34	Polea	1
35	Arandela masera para polea	1
36	Arandela frontal para la polea	1
37	112M_IEC91	1
38	Polea de motor	1
39	Polea de Polea	1
40	Volante	1

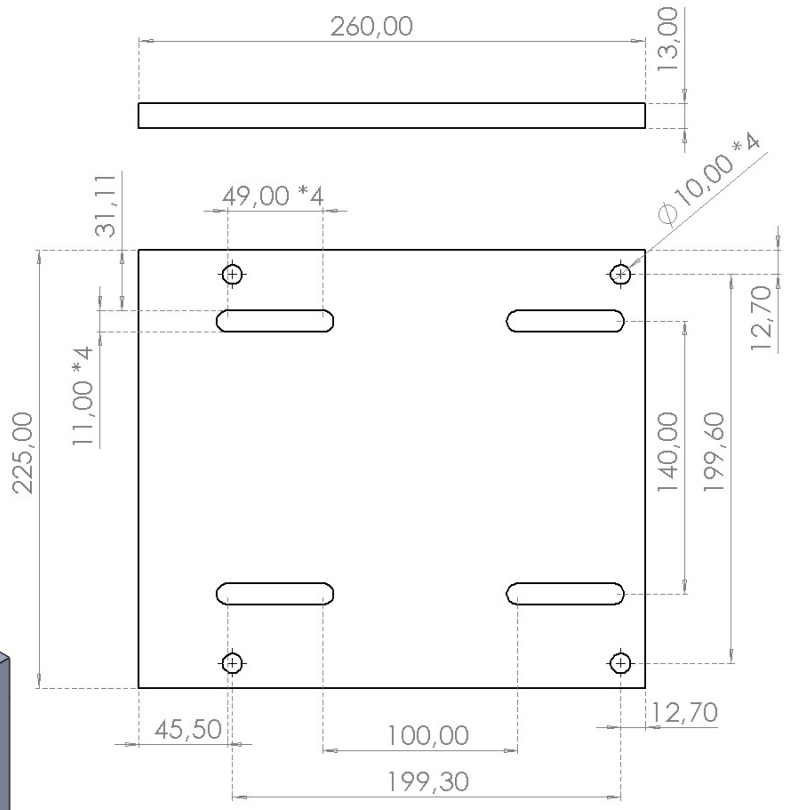
		1:1	mm
		Rectificador de masas	
		Varios	33



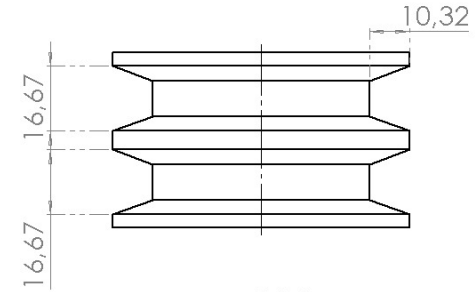


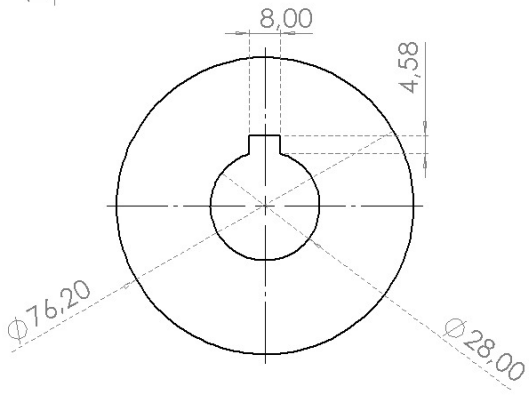
	Pieza: Platina base chumacera	Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN	
			SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm	
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO: Retificador de Masas		
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO 22		A3
Institucion					
Institución Universitaria Pascual Bravo		PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1	

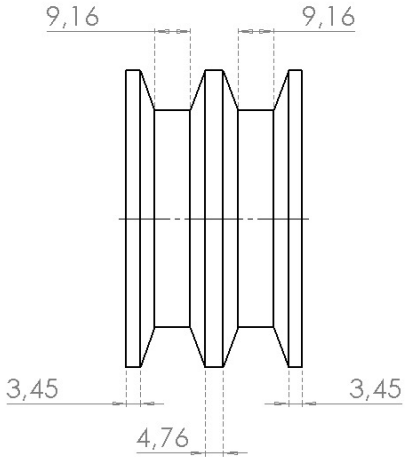


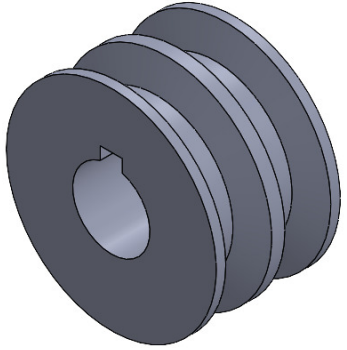


Pieza: Platina base motor			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO: 23	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

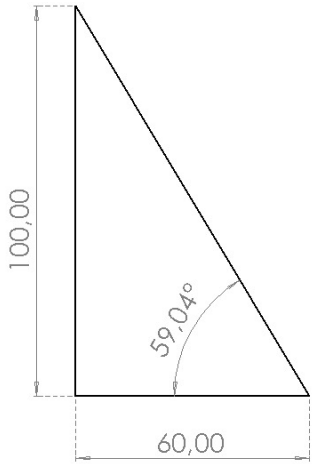


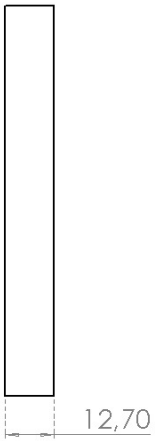


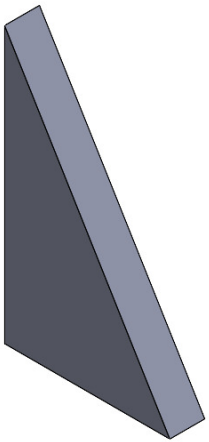




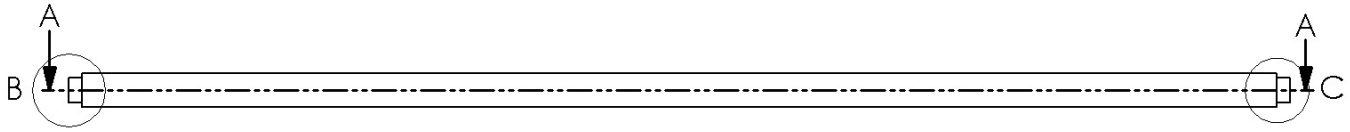
Pieza: Polea de motor			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Fundicion Gris	Nº DE DIBUJO: 24	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

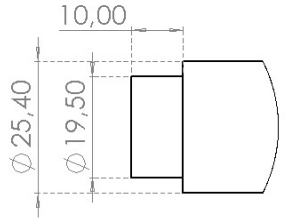






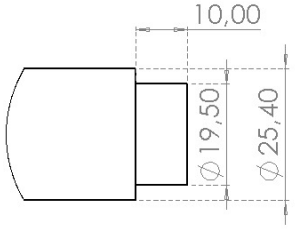
Pieza: Refuerzo platina base chumacera			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO: 26	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





DETALLE B

ESCALA 2 : 1.5



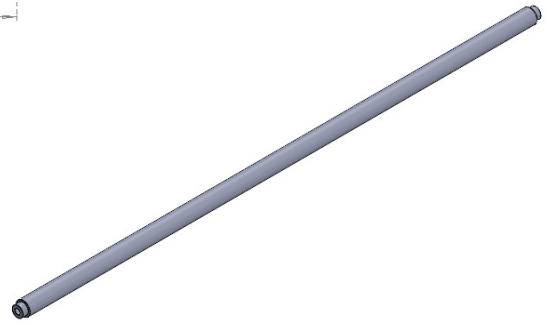
DETALLE C

ESCALA 2 : 1.5

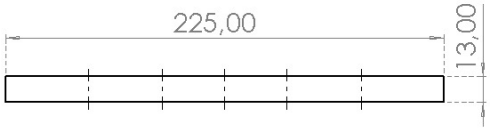


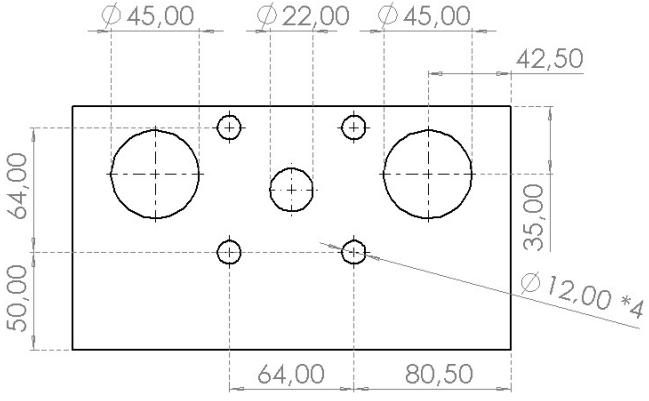
SECCIÓN A-A

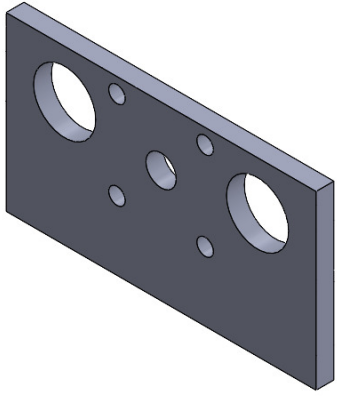
ESCALA 1 : 3



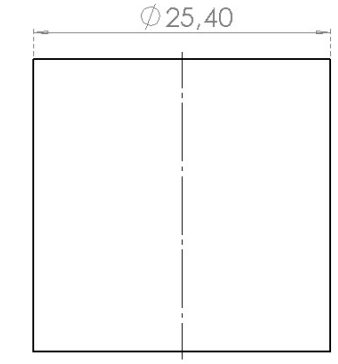
Pieza: Separador carro longitudinal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata				
Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045		Nº DE DIBUJO: 27	A3
Institucion					
Institución Universitaria Pascual Bravo		PESO:		ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1

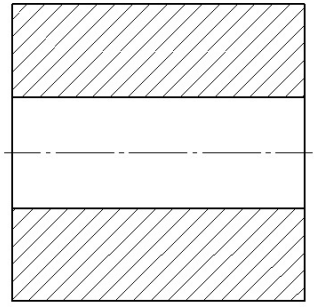






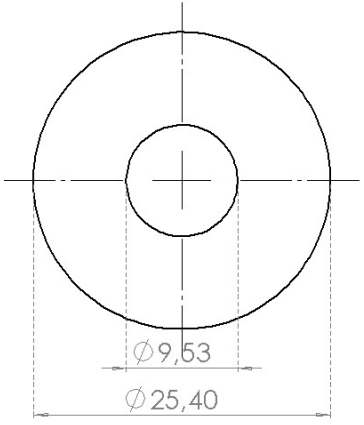
Pieza: Soporte para el carro transversal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO 28	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					

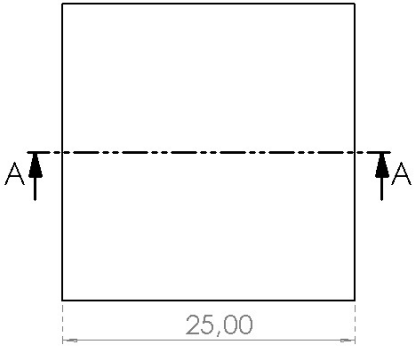


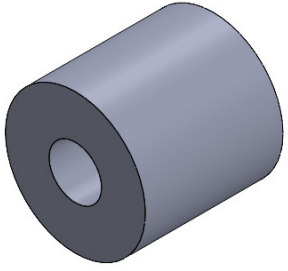


SECCIÓN A-A

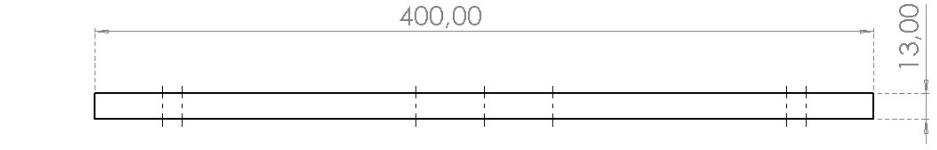
ESCALA 3 : 1

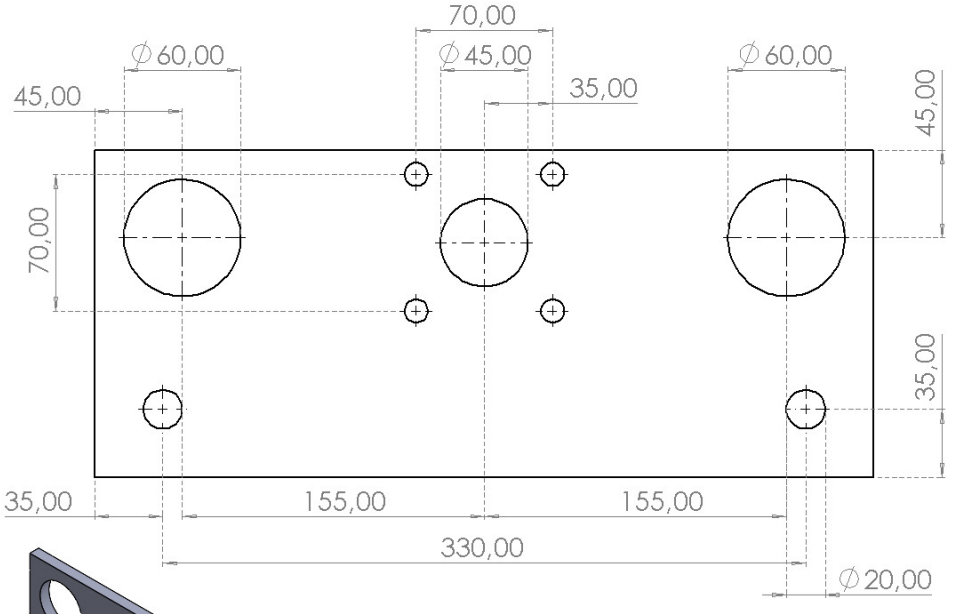


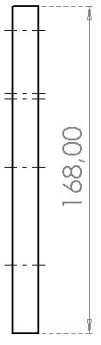


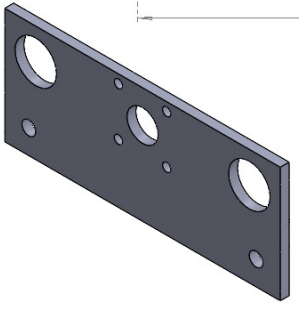


Pieza: soporte para base motor	Cantidad: 4	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN		
		SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm		
NOMBRE	FECHA	TÍTULO: Retificador de Masas			
DIBUJ. Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025				
Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025				
Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025				
FABR. Luis Ernesto Cano Sepulveda					
CALID. Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1020	Nº DE DIBUJO 29	A3	
Edison Garces Zapata					
Institucion		PESO:	ESCALA 2:1	HOJA 1 DE 1	
Institución Universitaria Pascual Bravo					

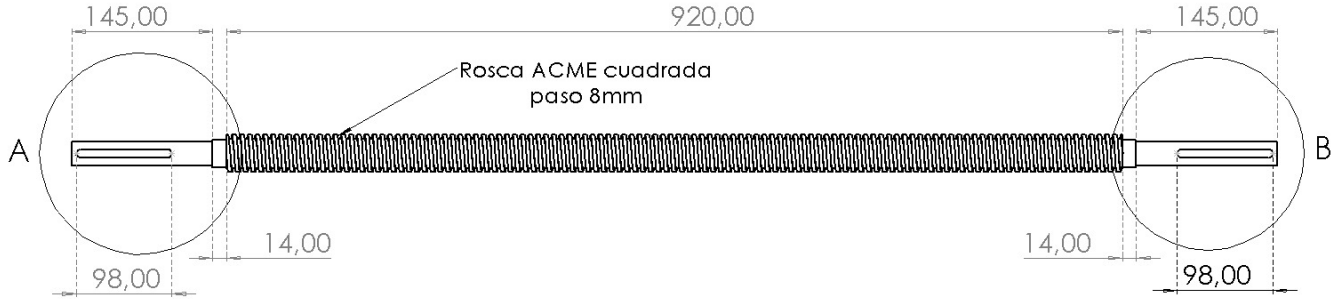


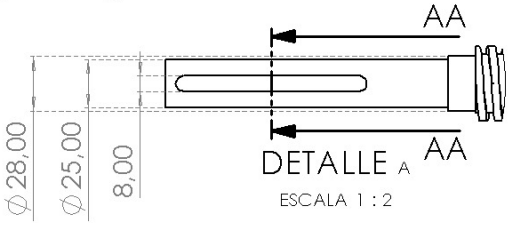






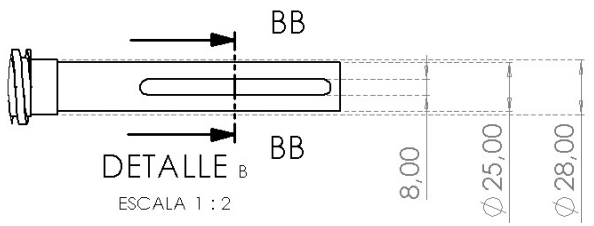
Pieza: Tapa lateral para la estructura para carro longitudinal			Cantidad: 2	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28/05/2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28/05/2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28/05/2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: HR - A36	Nº DE DIBUJO: 30	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





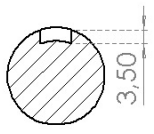
DETALLE A

ESCALA 1 : 2



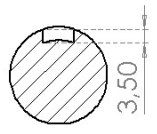
DETALLE B

ESCALA 1 : 2



SECCIÓN AA-AA

ESCALA 1 : 1



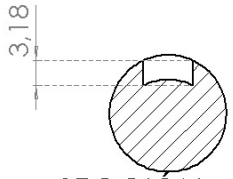
SECCIÓN BB-BB

ESCALA 1 : 1



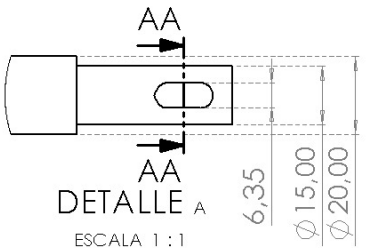
Pieza: Tornillo carro longitudinal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 31	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					





SECCIÓN AA-AA

ESCALA 2 : 1



DETALLE A

ESCALA 1 : 1



Pieza: Tornillo carro transversal			Cantidad: 1	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				SISTEMA DE MEDIDA: S.I	UNIDAD DE MEDIDA: mm
	NOMBRE	FECHA		TÍTULO: Retificador de Masas	
DIBUJ.	Heiner Mateo Torres Martinez	28 / 05 / 2025			
	Valeria Arboleda Castañeda	28 / 05 / 2025			
	Luis Ernesto Cano Sepulveda	28 / 05 / 2025			
FABR.	Luis Ernesto Cano Sepulveda				
CALID.	Edison Garces Zapata		MATERIAL: Acero 1045	Nº DE DIBUJO: 32	A3
Edison Garces Zapata					
Institucion			PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1
Institución Universitaria Pascual Bravo					