



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Pachuca

DESARROLLO DE MÁQUINA PARA ENSAYOS DE ABRASIÓN BAJO LA NORMA ASTM G65

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
ING. LUIS ANTONIO MARTÍNEZ BUTRÓN

DIRECTOR:
DR. EDGAR ERNESTO VERA CARDENAS

SINODALES:
DRA. MARISA MORENO RIOS
DR. HUGO FRANCISCO ABUNDIS FONG

Pachuca de Soto, Hgo. Septiembre 2022
131 páginas



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: RSGC-1000
Vigencia: 2002-07-28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción
hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



Pachuca, Hidalgo, 9/Septiembre/2022
OFICIO No. DEPI-0129-22

**C. ING. LUIS ANTONIO MARTÍNEZ BUTRÓN
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

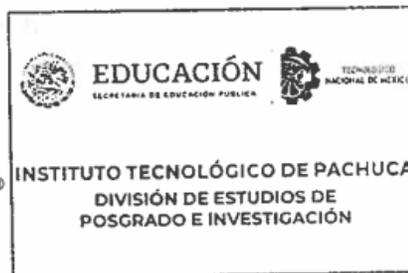
**Desarrollo de máquina para ensayos de abrasión
bajo la norma ASTM G65**

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el ingenio en Contacto con la Ciencia"®



M. A. C. ELODIA CLAUDIA SUÉRRERO ORTIZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Archivo
ECGO/LMPP



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: ISSIC-1002
Vigencia: 2022-07-28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México - Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón



Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica ACTA

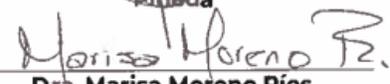
Siendo las 13:00 horas del 19 de febrero de 2022, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: *Desarrollo de máquina para ensayos de abrasión bajo la norma ASTM G65*, con el siguiente contenido:

- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1- Introducción
- 2- Estado del arte
- 3- Marco teórico
- 4- Metodología de diseño
- 5- Resultados
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Luis Antonio Martínez Butrón obtenga el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Édgar Ernesto Vera Cárdenas.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"®

 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Juan Serrano Arellano	 Dr. Luis Manuel Palacios Rineda
 Dra. Erika Osiris Ávila Dávila	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos
 Dr. Armando Irvin Martínez Pérez	 Dr. Francisco Noe Demesa	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Instituto Tecnológico de Pachuca
ISO 9001:2015
Registro: #SEC.1002
Vigencia: 2022.07.28
Alcance: Proceso educativo, comprende desde la inscripción hasta la entrega del título profesional.

Carretera México – Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399

e-mail: depi@pachuca.tecnm.mx | tecnm.mx | pachuca.tecnm.mx



2022 Ricardo Flores Magón
Año de Magón
PRELUDIO DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para mis estudios de posgrado, con la cual pude obtener los recursos necesarios para concluir en tiempo y forma mi tesis.

Al personal docente de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Pachuca por los conocimientos transmitidos en las aulas y su valioso apoyo durante el desarrollo de la tesis.

Contenido

Contenido.....	IV
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
1.5 Contenido de los capítulos.....	3
2. Estado del arte	4
2.1 Desgaste por abrasión y su medición	4
2.2 Máquinas de abrasión bajo la norma ASTM G65	7
2.3 Análisis de contacto tribológico presente en una máquina de abrasión por rueda de caucho	11
3. Marco Teórico.....	14
3.1 Tribología	14
3.2 Desgaste.....	15
3.2.1 Tipos de desgaste.....	15
3.2.1.1 Desgaste por adhesión	15
3.2.1.2 Desgaste por fatiga	16
3.2.1.3 Desgaste por impacto.....	16
3.2.1.4 Desgaste químico (corrosivo).....	16
3.2.1.5 Desgaste inducido por el arco eléctrico	17
3.2.1.6 Frotación y Corrosión por frotamiento.....	17
3.2.1.7 Desgaste abrasivo	17
3.3 Ensayos de desgaste.....	22
3.4 Método de la prueba estándar para medición de la abrasión con rueda de caucho / arena seca	25
3.4.1 Procedimientos	26
3.4.2 Resumen del método de prueba.....	27
3.4.3 Componentes principales.....	28
3.4.4 Materiales de estudio	30
3.4.5 Proceso.....	30
3.4.6 Cálculo de resultados.....	31
4. Metodología de diseño	33

4.1 Metodología de diseño empleada	33
4.1.1 Clarificación de objetivos	33
4.1.2. Establecimiento de funciones	35
4.1.3 Fijación de requerimientos	36
4.1.4. Determinación de Características.	38
4.1.5 Generación de alternativas.....	38
4.1.6. Evaluación de alternativas	40
4.1.7 Resultados de la metodología	40
4.2 Diseño conceptual.....	42
5. Resultados	45
5.1 Diseño a detalle	45
5.1.1 Transmisión de carga.....	46
5.1.2 Transmisión de potencia.....	55
5.1.3 Estructura.....	66
5.1.4 Ensamble preliminar del diseño a detalle	68
5.2 Construcción de la máquina	70
5.2.1 Estructura.....	70
5.2.1.1 Estructura de aluminio.....	70
5.2.1.2 Guardas de seguridad.....	72
5.2.2 Transmisión de carga.....	73
5.2.2.1 Brazo de palanca.....	73
5.2.2.2 Portaprobeta.....	74
5.2.2.3 Eje, buje y abrazaderas de sujeción	74
5.2.3 Transmisión de potencia.....	76
5.2.3.1 Disco de abrasión.....	76
5.2.3.2 Eje de transmisión	77
5.2.3.3 Base para chumaceras.....	78
5.2.3.4 Motorreductor.....	78
5.2.3.5 Acople.....	79
5.2.4 Tolvas	80
5.2.4.1 Tolva superior.....	80
5.2.4.2 Base y llave de apertura y cierre.....	81
5.2.4.3 Boquilla y base de boquilla.	82
5.2.5 Control.....	82
5.2.6 Ensamble general.....	83
5.3 Análisis de contacto.....	84

5.3.1 Introducción al análisis y propiedades de materiales.	84
5.3.1.1 Análisis de contacto Caucho-Acero	84
5.3.1.2 Caucho-Aluminio	87
5.3.2 Análisis numérico	91
5.3.2.1 Configuración del análisis.	91
5.3.2.2 Caucho-Acero.....	94
5.3.2.3 Caucho-Aluminio.	97
5.3.3 Resultados del análisis de contacto	99
5.4 Pruebas preliminares.....	100
5.4.1 Preparación de probeta	100
5.4.2 Preparación del equipo	101
5.4.3 Resultados de la prueba y discusión	101
6. Conclusiones	104
Referencias	105
Anexos	108
Anexo 1. Planos.....	108
Anexo 2. Costos.....	119
Anexo 3.....	120
Productos académicos.....	121

Lista de tablas

Tabla 1. Resumen ensayos de desgaste.	22
Tabla 2. Parámetros del ensayo.	26
Tabla 3. Lista de objetivos.....	34
Tabla 4. Objetivos de nivel superior e inferior.	34
Tabla 5. Fijación de requerimientos.	37
Tabla 6. Generación de alternativas.	39
Tabla 7. Asignación de calificaciones.	40
Tabla 8. Evaluación del mecanismo para sujetar la probeta.....	40
Tabla 9. Evaluación de alternativas de transmisión de potencia.	40
Tabla 10. Alternativas seleccionadas.....	41
Tabla 11. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_t y K_{ts}	59
Tabla 12. Dimensiones de cuñas cuadradas y rectangulares estándar.....	62
Tabla 13. Comparativa de propiedades de los cauchos.	76
Tabla 14. Propiedades de los materiales	84
Tabla 15. Caucho-acero.....	99
Tabla 16. Caucho-aluminio.	99
Tabla 17. Valores de dureza y rugosidad.	100
Tabla 18. Valores de dureza y rugosidad.	101
Tabla 19. Resultados de la prueba.	102
Tabla 20. Comparación de volumen perdido.....	102

Lista de figuras

Figura 1. Esquemas de (a) una superficie dura y rugosa montada con granos abrasivos que se deslizan sobre una superficie más blanda, y (b) granos abrasivos que quedan atrapados entre la superficie con al menos una de las superficies más suave que los granos abrasivos.	18
Figura 2. Modos de eliminación de material.	19
Figura 3. Diagrama de máquina para ensayos de abrasión.	27
Figura 4. Dimensiones de rueda de caucho.	28
Figura 5. Diseño de boquilla.	29
Figura 6. Árbol de objetivos.	35
Figura 7. Caja negra.	36
Figura 8. Caja transparente.	36
Figura 9. Casa de la calidad.	38
Figura 10. Diseño inicial del sistema de transmisión.	
Figura 11. Sistema de transmisión, vista 1.	42
Figura 12. Sistema de transmisión, vista 2.	42
Figura 13. Diseño inicial de la palanca.	
Figura 14. Diseño conceptual final de la palanca.	43
Figura 15. Máquina de abrasión.	44
Figura 16. Diseño conceptual final.	44
Figura 17. Análisis estático.	46
Figura 18. Deformación de palanca.	48
Figura 19. Esfuerzo en la palanca.	48
Figura 20. Palanca.	
Figura 21. Soportes de la palanca.	49
Figura 22. Simulación de la palanca.	49
Figura 23. Deformación final en la palanca.	50
Figura 24. Esfuerzo final en la palanca.	50
Figura 25. Dimensiones del perno.	51
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre.	51
Figura 27. Diagrama de cortante.	51
Figura 28. Diagrama de momentos.	52
Figura 29. Deformación del perno.	53
Figura 30. Esfuerzos en el perno.	53
Figura 31. Porta probeta, vista 1.	
Figura 32. Porta probeta, vista 2.	54
Figura 33. Esfuerzos presentes en porta probeta, vista 1.	54
Figura 34. Esfuerzos presentes en porta probeta vista 2.	55
Figura 35. Sistema de transmisión de carga, vista 1.	
Figura 36. Sistema de transmisión de carga, vista 2.	55
Figura 37. Fuerzas presentes en el eje.	56
Figura 38. Propuesta del eje.	56
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre.	57
Figura 40. Diagrama de fuerzas cortantes.	57
Figura 41. Diagrama de momentos.	58
Figura 42. Diagrama de cuerpo libre.	58
Figura 43. Diagrama de fuerzas cortantes.	58
Figura 44. Diagrama de momentos.	59
Figura 45. Dimensiones finales del eje.	63

Figura 46. Esfuerzo presente en el eje.....	64
Figura 47. Deformación en el eje.	65
Figura 48. Transmisión, vista 1.	
Figura 49. Transmisión, vista 2.	65
Figura 50. Deformación en la estructura.	66
Figura 51. Esfuerzo en la estructura.	66
Figura 52. Medición de la transmisión.	67
Figura 53. Estructura.	67
Figura 54. Ensamble, vista 1.	68
Figura 55. Ensamble, vista 2.	69
Figura 56. Perfil 40x40mm.....	70
Figura 57. Perfil 40x80mm.....	70
Figura 58. Elementos de la estructura.	71
Figura 59. Detalle de unión de 2 perfiles con sujetadores.....	71
Figura 60. Ensamble de la estructura.....	71
Figura 61. Bisagras.	72
Figura 62. Puertas de acrílico, cerradas.	72
Figura 63. Guardas.	73
Figura 64. Brazo de palanca.	73
Figura 65. Portaprobeta.	74
Figura 66. Eje y abrazaderas.....	74
Figura 67. Buje de ajuste.	75
Figura 68. Sistema de transmisión de carga.	75
Figura 69. Disco de acero.	
Figura 70. Disco con vulcanizado.	77
Figura 71. Maquinado de eje.	77
Figura 72. Eje de transmisión.	78
Figura 73. Base de chumaceras.	
Figura 74. Arreglo del disco de abrasión.....	78
Figura 75. Motorreductor.	79
Figura 76. Acople vista 1.....	79
Figura 77. Sistema de transmisión de potencia.	80
Figura 78. Doblado de tolva.	
Figura 79. Tolva soldada.	80
Figura 80. Base de tolva.	
Figura 81. Arreglo de base y tolva.	81
Figura 82. Llave de paso.....	81
Figura 83. Boquilla.	
Figura 84. Base de boquilla.	82
Figura 85. Gabinete de control.	82
Figura 86. Ensamble general de la máquina.....	83
Figura 87. Introducción de datos Caucho-Acero.....	86
Figura 88. Resultados Caucho-Hacer.	86
Figura 89. Esfuerzo cortante en objeto 1.	
Figura 90. Esfuerzo cortante en objeto 2.....	86
Figura 91. Distribución del esfuerzo a lo largo del eje X.....	87
Figura 92. Introducción de datos Caucho-Aluminio.	88
Figura 93. Resultados Caucho-Aluminio.	89

Figura 94. Esfuerzo cortante en objeto.	
Figura 95. Esfuerzo cortante en objeto.....	89
Figura 96. Distribución del esfuerzo a lo largo del eje X.....	90
Figura 97. Geometría.....	91
Figura 98. Contacto disco-caucho.....	92
Figura 99. Contacto caucho-probeta.....	92
Figura 100. Discretización.....	93
Figura 101. Condiciones de frontera.....	93
Figura 102. Condiciones de frontera.....	94
Figura 103. Presión de contacto, a detalle.....	94
Figura 104. Deformación total.....	95
Figura 105. Máximo esfuerzo cortante.....	95
Figura 106. Esfuerzo de Von Mises.....	96
Figura 107. Presión de contacto, Aluminio.....	97
Figura 108. Deformación total, Aluminio.....	97
Figura 109. Esfuerzo de Von Mises.....	98
Figura 110. Esfuerzo de Von Mises.....	98
Figura 111. Probetas.	
Figura 112. Toma de rugosidad.....	100
Figura 113. Ubicación de la probeta.	
Figura 114. Abrasivo.....	101
Figura 115. Probetas ensayadas.....	103

Resumen

En muchos de los equipos y componentes mecánicos se presenta el fenómeno de desgaste por abrasión, por lo que se hace importante realizar pruebas de laboratorio para su estudio y así tratar de corregir los efectos negativos de este fenómeno. El objetivo de este proyecto es desarrollar una máquina que permita hacer pruebas de desgaste por abrasión seca bajo la norma ASTM G65, con el fin de conocer el desempeño tribológico de los diferentes materiales ensayados y contribuir al fortalecimiento de la infraestructura del Instituto tecnológico de Pachuca. Para el desarrollo de esta máquina se utilizó la metodología de diseño propuesta por Nigel Cross, la cual permite llegar a un diseño conceptual bien estructurado, para posteriormente iniciar con el análisis y simulación del diseño final con el apoyo de software CAD-CAE. A partir de este diseño se generaron los planos de construcción para realizar los maquinados y se compraron las piezas necesarias para su fabricación. Una vez ensamblada la máquina se comienza con las primeras pruebas para validar su correcto funcionamiento, concluyendo que la máquina ofreció confiabilidad en los resultados y seguridad en las pruebas. Finalmente se presenta el estudio del contacto mecánico de Hertz, empleando el método analítico y numérico, con el fin de conocer los campos de esfuerzo y deformación en el contacto cilindro plano presentes en esta máquina.

Abstract

Abrasive wear is present in many mechanical equipment and mechanical components, so it is important to perform experimental tests for its study and thus try to correct the negative effects of this phenomenon. The objective of this project is to develop a machine to perform abrasive wear tests under the ASTM G65 standard, in order to know the tribological performance of the different materials tested and contribute to the strengthening of the infrastructure of the Instituto Tecnológico de Pachuca. For the development of this equipment, the design methodology proposed by the author Nigel Cross was used, which allows us to reach a well-structured conceptual design, to later start with the analysis and simulation of the final design with the support of CAD-CAE software. From this design, the drawings were generated to carry out the fabrication and the needed parts were purchased for finish the fabrication. Once the machine was assembled, the first tests were carried out to validate its correct operation, concluding that the machine offered reliability in the results and safety in the tests. Finally, the study of the Hertz mechanical contact is presented, using the analytical and numerical method, in order to know the stress and deformation fields in the flat cylinder contact present in this machine.

1. Introducción

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la lubricación, la fricción y el desgaste de partes que interactúan en movimiento relativo entre sí. Comprender la naturaleza de estas interacciones y resolver los problemas tecnológicos asociados con los fenómenos en las interfases móviles constituye la esencia de la tribología [1].

El estudio de la tribología requiere de una serie de disciplinas, incluida la ingeniería mecánica, ciencia de materiales, mecánica, química de superficies, física de superficies, y materias, como caracterización de superficies, fricción, desgaste, selección de materiales y selección y diseño de sistemas de lubricación. La importancia del control de la fricción y el desgaste es sumamente importante principalmente por razones económicas y de confiabilidad del equipo a largo plazo [2].

El desgaste es el daño superficial o la eliminación de material de una o ambas superficies sólidas en un movimiento de deslizamiento, rodaje o impacto en relación con el otro. Dentro de los diferentes tipos de desgaste, existe el desgaste abrasivo, este desgaste se produce cuando las imperfecciones de una superficie áspera y dura, o partículas duras se deslizan en una superficie más suave y dañan la interfaz por deformación plástica o fractura [1].

Hay dos situaciones generales para el desgaste abrasivo, en el primer caso se tiene la abrasión de dos cuerpos, donde existen dos superficies en contacto y movimiento relativo entre sí y al ser una superficie más dura y áspera que la otra, la superficie suave sufrirá el desgaste, algunos ejemplos se observan en operaciones de maquinado, como el rectificado, el corte y el mecanizado; y en el segundo caso, y el principal a ser estudiado en este trabajo, la superficie dura pasa a ser un tercer cuerpo, generalmente una pequeña partícula de abrasivo atrapada entre las otras dos superficies que es lo suficientemente dura para ser capaz de desgastar una o ambas superficies, a este mecanismo se le llama desgaste abrasivo de tres cuerpos, este se puede observar en el proceso de lapeado o pulido. En la mayoría de las situaciones de desgaste abrasivo, el rayado de la superficie más blanda, se observa como una serie de ranuras paralelas a la dirección del deslizamiento [1].

1.1 Planteamiento del problema

En la mayoría de los procesos industriales y componentes mecánicos se presenta el desgaste por abrasión y la industria en su afán por mejorar los procesos, ha identificado el deterioro superficial de los materiales como un problema que reduce considerablemente la vida útil de los elementos de las máquinas, y en general el mal funcionamiento de los sistemas. Por lo cual se ha propuesto combatir los diferentes tipos de desgaste que presentan los materiales y herramientas de trabajo, interesándose particularmente en el desgaste producido por la fricción conocido como desgaste por

abrasión [3] teniendo en cuenta que la causa de la sustitución del 50% de los elementos de máquinas en la industria y el transporte es el desgaste abrasivo, pudiendo llegar al 85% en caso de la maquinaria agrícola, [4]

Por tal razón es importante su estudio, con la finalidad de corregir o disminuir estos efectos negativos, pero la mayoría de las veces no se cuenta con el equipo necesario para realizar ensayos experimentales del fenómeno y el estudio se limita a los resultados obtenidos por métodos numéricos.

Un caso de esta problemática es el Instituto Tecnológico de Pachuca (ITP) donde los estudiantes e investigadores no cuentan con un equipo para hacer ensayos de abrasión, específicamente de tres cuerpos por una rueda de caucho. Esta prueba se encuentra indicada en la norma ASTM G65.

1.2 Justificación

La importancia del trabajo radica en que actualmente con el desarrollo de nuevos materiales y principalmente recubrimientos que actúan contra los diferentes tipos de desgaste, gana peso la necesidad de contar con una máquina para ensayos de abrasión en instituciones y centros de investigación, dado que se ha presentado que al momento de calificar los procedimientos para la aplicación de recubrimientos, no se cuenta con la posibilidad de ensayar el depósito aplicado, de igual manera sucede para las nuevas aleaciones que se encuentran en desarrollo, por lo que se toma como base únicamente lo especificado en catálogos del proveedor de los materiales de aporte, conllevando esto a irregularidades en las propiedades reportadas de cada aleación o recubrimiento. La finalidad de aplicar el ensayo es estudiar la tasa de desgaste y las huellas generadas por este mismo en nuevos materiales y también de los que ya se encuentran operando en diferentes mecanismos dentro de la industria, y así brindar una solución que disminuya los efectos negativos del fenómeno y mejorar los procesos de desarrollo de aleaciones y recubrimientos, generando un impacto positivo tanto en la industria como en el área de investigación y desarrollo tecnológico. Otro punto importante es que con el desarrollo propio de la máquina se busca disminuir considerablemente su costo, se contactó directamente con los proveedores de este tipo de máquinas para ensayos y su precio ronda los 50,000 dólares.

1.3 Hipótesis

Se espera que al realizar el diseño y construcción de una máquina para ensayo de abrasión según la norma ASTM G65 para que quede al servicio del ITP, se podrá conocer el desempeño tribológico de los diferentes materiales ensayados y fortalecer la infraestructura del Instituto Tecnológico de

Pachuca para la investigación interna, así como la posibilidad de ofrecer servicios externos a industrias u otras instituciones de investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y construir una máquina para hacer pruebas de desgaste por abrasión de acuerdo con la norma ASTM G65 por medio de una metodología de diseño, análisis por medio de software y aplicación de teorías de diseño.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Aplicar una metodología de diseño específica para generar el diseño conceptual del sistema.
2. Generar el diseño a detalle a partir de las teorías de diseño existentes.
3. Estudiar y realizar el análisis del contacto tribológico específico que se presenta en una máquina de estas características, con la finalidad de conocer los esfuerzos presentes y tomarlos en cuenta durante el diseño.

1.5 Contenido de los capítulos

En el capítulo 1, en el estado del arte se presenta una breve reseña de trabajos importantes acerca del desgaste abrasivo, así como las recientes aportaciones a la materia en general, en el capítulo 2 se muestra una recopilación de trabajos enfocados específicamente en el desarrollo y análisis de máquinas de abrasión bajo la norma ASTM G65 y de la literatura que obedece al tipo de contacto tribológico presente en una prueba de este tipo.

En el siguiente apartado, el marco teórico, se presentan conceptos y teoría fundamental acerca del fenómeno de desgaste por abrasión, también se encuentra un resumen de la norma ASTM G65, así como toda la teoría relevante necesaria para realizar el estudio y diseño de la máquina,

En capítulo 4 se presenta la metodología usada para el desarrollo del diseño conceptual. La metodología utilizada fue la propuesta por el autor Nigel Cross en su libro titulado “Métodos de diseño” [5], se desarrolla cada punto de la metodología con el fin de llegar a un diseño conceptual, para posteriormente mostrar los cálculos y análisis de elemento finito del diseño a detalle, de igual manera se presenta el apartado de construcción, donde se detalla el proceso de desarrollo de la máquina, para después presentar las pruebas realizadas para comprobar su correcto funcionamiento. En una parte final se muestra el desarrollo del análisis del contacto tribológico cilindro-plano, aplicado específicamente a las condiciones de la máquina desarrollada.

2. Estado del arte

La necesidad de la industria por mejorar sus procesos y aumentar la duración de los elementos mecánicos, ha impulsado la investigación en el área tribológica, a continuación, se presenta una breve reseña de los trabajos más recientemente publicados que hablan sobre el desgaste por abrasión y su medición. En una segunda parte se muestran los trabajos que específicamente tratan el ensayo de abrasión bajo la norma ASTM- G65 y por último del análisis de contacto tribológico presente, principalmente por simulación numérica.

2.1 Desgaste por abrasión y su medición

En el artículo con nombre “Evaluación del método de resistencia a la abrasión de las areniscas en el aparato de ensayo de abrasión de Böhme” publicado en el año 2020 [6], analiza 14 muestras de areniscas (tipo de roca sedimentada) secas y saturadas de agua. El análisis de los resultados mostró que para el caso de la abrasión de muestras secas la pérdida de volumen durante el proceso de abrasión en las etapas individuales de la prueba es más pequeña con el aumento de la rotación en el disco, de esto depende la mezcla del abrasivo y el desgaste en la piedra. En el caso de muestras ensayadas en condiciones de saturación de agua, la muestra se cubre con el grano abrasivo, que en fases posteriores se licúa y se mezcla con la masa de piedra gastada. En este caso, sin embargo, la abrasión es peor en comparación con las muestras probadas en estado seco, porque el líquido y el grano abrasivo mezclado con la masa rocosa desgastada hace que la muestra se deslice, lo que a su vez da como resultado la pérdida de volumen por abrasión. El valor de la resistencia a la abrasión de la piedra resulta de la prueba indicada por la norma UN-EN 14157 [6].

En el 2019 se publica un método modificado para la prueba de abrasión de “Los Ángeles” [7] dado que como lo mencionan los autores los proyectos de desarrollo de infraestructura están en su apogeo, lo que resulta en una gran demanda de materiales de construcción.

Los agregados son uno de los materiales más comunes disponibles naturalmente y se utilizan tanto en cemento como en hormigón asfáltico. La evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de estos, adquiere importancia ya que afecta directamente al producto en el que se utilizan como constituyente. Los agregados deben ser duros y lo suficientemente resistentes para soportar el aplastamiento, la degradación y la desintegración en cualquier actividad asociada, incluida la fabricación, acopio, producción, colocación y compactación. En este artículo, se intenta desarrollar un método modificado para determinar la resistencia a la abrasión.

Diferentes tamaños de agregados fueron probados en el laboratorio utilizando tanto la prueba estándar como modificada de abrasión de “Los Ángeles” (LAA), los resultados muestran que el

método de prueba LAA modificado, disminuye el tiempo requerido para realizar la prueba, además de reducir los costos. Dado que el método LAA modificado se desarrolla teniendo en cuenta las condiciones climáticas y geológicas del lugar [7].

En otro trabajo se estudia el efecto de la concentración de la austenita retenida sobre la resistencia al desgaste por abrasión en aceros bainíticos sin carburo [8]. Usando una máquina de prueba de desgaste por abrasión por impacto MLD-10, se demostró que una alta concentración de austenita retenida produjo un menor desgaste, mejorando la resistencia en aceros bainíticos.

La concentración de austenita fue suficiente para suprimir la transformación de austenita a martensita. La austenita retenida no solo mejoró la dureza de la superficie de contacto, pero también resistió la apertura y propagación de grietas por deformación y transformación. Además, la eliminación de material mediante micro-corte y micro-fisuración fueron las contribuciones dominantes a la pérdida de masa durante el desgaste abrasivo por impacto. Por lo tanto, se desarrolló un modelo de desgaste basado en mecanismos de corte, fractura, dureza y tenacidad a la fractura fueron los factores clave que dominaron la resistencia al desgaste por abrasión por impacto [8].

En el estudio denominado “Propiedades mecánicas, de absorción de humedad y de resistencia a la abrasión de compuestos de fibra de vidrio de bambú, yute” [9] Se ha demostrado que los materiales compuestos son alternativas eco-amigables a muchos materiales tradicionales para su uso en aplicaciones de ingeniería. Además de su superior resistencia a la corrosión, los materiales compuestos también ofrecen el máximo alcance para la reducción de peso debido a su gran resistencia y menor densidad.

En este estudio experimental, compuestos de fibras naturales (yute y bambú) y fibra de vidrio reforzada se desarrollaron mediante un método de colocación manual y sus propiedades mecánicas, resistencia a la absorción y respuestas a la abrasión evaluadas según las normas ASTM y comparadas en condiciones secas contra húmedas.

Los resultados muestran que tal uso de fibras de yute y bambú con polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) puede resultar en buenas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y resistencia a la absorción de humedad, lo que representa un buen material sustituto de los polímeros reforzados con fibra de vidrio [9].

En el 2018 se investigó la abrasión de los materiales compuestos de cemento de ingeniería (ECC) en medio acuoso haciendo referencia a los utilizados en las estructuras hidráulicas, utilizando el método de ensayo de abrasión ASTM C1138 [10].

Las muestras de ensayo se dividieron en dos grupos, el primero fue dirigido a estudiar el efecto del contenido de fibra PVA, mientras que el segundo investigó el efecto del espesor de la capa de recubrimiento de ECC. Los ensayos se realizaron a tiempos de curado de 3, 7 y 28 días. Los resultados de las pruebas mostraron que la resistencia a la abrasión aumenta a medida que aumenta el contenido de PVA. A una edad de 28 días, la incorporación de contenidos bajos de PVA (0,5% y 1,0%) aumentó la resistencia a la abrasión en un aproximadamente un 20%, mientras que la inclusión de altos contenidos de PVA (1,5% y 2,0%) mejoró la resistencia a la abrasión significativamente con mejoras porcentuales que van del 50 al 95%.

Los resultados de las pruebas también mostraron que el recubrimiento del hormigón normal con capa de 1 cm de ECC no es eficaz durante la edad temprana de curado de este material, mientras que una capa de 3 cm de espesor mostró una buena resistencia a la abrasión a edades tempranas y maduras. [10]

En el artículo con nombre “Nuevas perspectivas en la simulación de abrasión de metales duros” se estudió la respuesta de los metales duros de carburo de tungsteno con diferentes composiciones químicas y tamaños de grano de carburo con un indentador de diamante, se ha investigado en dos regímenes principales; una sola pasada y un régimen de varias pasadas destinado a simular la abrasión de dos cuerpos experimentada cuando el metal es puesto en contacto con un material más duro y de alta resistencia al aplastamiento. El régimen de dos cuerpos pretende simular los modos de degradación en el campo cuando está presente una contracara no conforme. La prueba de paso múltiple se logra mediante un programa de computadora de escritorio que genera distribuciones espaciales preestablecidas para definir la posición lateral de los eventos de abrasión individuales con las marcas generadas acumulándose como un modelo de un proceso de abrasión. Las superficies (y las secciones pre pulidas de la subsuperficie) se analizaron mediante perfilometría óptica de reubicación, análisis por dispersión de energía de rayos x y fresado por haz de iones [11]. En un siguiente trabajo se abordó el Método de prueba de abrasión New Rock para evaluaciones de la vida útil de la herramienta en Hard Rock Tunnel Boring: The Rolling Indentation Abrasion test (RIAT)

La utilización de máquinas tuneladoras (TBM) ha llegado a ser ampliamente utilizado y actualmente tiene una presencia importante dentro de la industria de la construcción de túneles. Grandes inversiones y alto riesgo geológico están involucradas usando tuneladoras y cortadoras de disco, el consumo de herramientas tiene una gran influencia en el rendimiento y costo, especialmente en condiciones de roca dura.

El desgaste abrasivo es el proceso más común que afecta al cortador. Un nuevo método de prueba de abrasión por disco rodante denominado prueba de abrasión por indentador rodante (RIAT) ha sido desarrollado. El objetivo de la nueva prueba es reproducir el comportamiento de desgaste en túnel de roca dura de una manera más realista que en métodos usados tradicionalmente. El procedimiento RIAT indica una gran capacidad para evaluar el desgaste abrasivo en los discos de corte [12].

2.2 Máquinas de abrasión bajo la norma ASTM G65

A lo largo de los años, se ha identificado que uno de los mecanismos de desgaste más común en la industria minera es el desgaste por abrasión, siendo evidente en los equipos como trituradores y bombas de mineral entre otros. El propósito de esta investigación realizada en el 2017 fue analizar el efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la microestructura y resistencia al desgaste abrasivo de cinco fundiciones blancas de alto cromo Fe-23Cr-3C. Se utilizaron cinco placas fundidas fabricadas según la norma ASTM A532 Clase II tipo D, modificadas con 1% Mo, 1,5% Mo, 3% Mo, 3% Mo - 1% V, y 3% Mo - 2%V. Estas placas se cortaron por electroerosión para obtener las probetas necesarias para estudiar la metalografía, las propiedades mecánicas y la resistencia al desgaste de cada una de ellas. Los materiales se caracterizaron mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, ensayos de micro y macro dureza, ensayo de impacto Charpy y ensayos de desgaste según la norma G-65 [13].

En el siguiente trabajo los autores Kenneth G. Budinski y Steven T. Budinski hablaron sobre la sustitución de la prueba de abrasión de tres cuerpos con la prueba de abrasión de dos cuerpos.

La prueba de abrasión con rueda de caucho seca (ASTM-G65) es probablemente la prueba de abrasión más utilizada. Sin embargo, esta prueba se desarrolló cuando los aceros y los revestimientos duros de fusión eran los materiales que más se utilizaban, y solían clasificarse con esta prueba.

Dos problemas importantes han surgido en el uso de esta prueba:

1. El abrasivo (sílice) no es lo suficientemente agresivo para muchos materiales modernos.
2. Hay muchos problemas con la variabilidad y la disponibilidad de los cauchos utilizados para forzar la abrasión contra la superficie de ensayo.

Este proyecto se inició para investigar la viabilidad de la utilización del ensayo de abrasión en ASTM-G174 para sustituir el ensayo ASTM-G65. Los ensayos de fricción se llevaron a cabo en diversos sustratos con ruedas de caucho pero también se realizaron pruebas sustituyendo la rueda de caucho por una rueda de acero. Por último, se realizaron pruebas para establecer una correlación

entre los resultados de las pruebas ASTM-G65 y los resultados de las pruebas ASTM-G174. Se desarrolló una curva de correlación para permitir la conversión de los datos históricos de la norma ASTM G-65 a los resultados obtenidos con la prueba de abrasión de dos cuerpos de la norma ASTM G-174 [14].

En el artículo con nombre “Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65”, se logró construir y poner a punto un equipo para ensayos de desgaste abrasivo, cumpliendo con los requisitos exigidos por la Norma ASTM G-65. Se realizó la calibración de las siguientes variables: diámetro y dureza del recubrimiento de caucho, tamaño de grano, humedad y flujo del abrasivo, velocidad del motor y fuerza ejercida sobre la probeta. Luego se validó el funcionamiento del equipo según el procedimiento B que se indica en la norma [15], usando diferentes tipos de materiales: hierro gris, bronce y recubrimientos a base de níquel, presentándose repetitividad en los resultados para cada material y con esto al aplicar los métodos estadísticos, se determinó el coeficiente de variación, el cual dio por debajo del límite máximo permitido en la norma (6%) [15]. Los autores Rajeev Namdeo y Sudhir Tiwari desarrollaron una máquina para la estimación del desgaste abrasivo de tres cuerpos. El dispositivo para prueba de abrasión de rueda de caucho desarrollada se utilizó para estimar el desgaste abrasivo de componentes de automóviles, donde los diferentes elementos varían su resistencia a la abrasión desde unas muy bajas hasta otras demasiado altas. Los estándares para cumplir son los descritos en los procedimientos A, B, C, D o E de la norma ASTM G65, en este proyecto se rescata el cambio de la arena de Ottawa, que es la que recomienda la norma, pero en ciertos casos es costosa y difícil de conseguir por lo que se utilizó en su lugar la arena Narmada que es más fácil de adquirir a un menor costo. Esta arena tiene la forma recomendada, el contenido de humedad requerido y el tamaño de grano necesario para ser utilizada como agente abrasivo en la prueba.

El flujo de arena a la salida de la boquilla se ajustó a un caudal de 300 a 400 g/min, estos cambios no comprometieron la fiabilidad de la prueba, según mencionan los autores [16].

Por su parte en el año 2014 se discute el diseño y construcción de un "Aparato de rueda de arena / caucho seco" de acuerdo con la norma ASTM G 65, para determinar el desgaste abrasivo de diferentes materiales. El aparato diseñado cumple con los parámetros de trabajo establecidos en la norma, que permite pruebas de desgaste abrasivo con buenos resultados [17].

En otro trabajo se realizó el diseño de una máquina para ensayos de abrasión seca & abrasión Húmeda, esta máquina tribológica cumple con las configuraciones establecidas por las normas ASTM G65 y ASTM G105, por lo que las dimensiones de la máquina se establecieron para lograr ambas configuraciones en una sola y así cumplir con el propósito de cada prueba. El disco posee

una deflexión relativamente alta debido a que a la deflexión del aluminio con el que está construida la estructura del dispositivo, se le añade la deflexión de la goma [18].

En el artículo publicado por Scientia et Technica, llamado “Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma técnica ASTM G-65, hace énfasis en el control de las variables durante el diseño de la máquina de ensayo y que estas estén apegadas a los lineamientos de la norma que rige el ensayo, también otorga el análisis estadístico, donde se comprueba el correcto funcionamiento del dispositivo dado que los resultados arrojados por las pruebas realizadas muestran un nivel de repetibilidad, lo que garantiza una medida confiable en los resultados.

Se validó el funcionamiento del equipo usando un acero AISI 4340, según los estándares de la prueba tipo E, con lo cual se validó el funcionamiento del equipo y se confirmó la confiabilidad de este mismo [4].

También se presenta un trabajo donde realizó la evaluación de la arena utilizada como abrasivo en la prueba descrita por la norma ASTM G65, se describe que las pruebas estandarizadas requieren la coherencia de todos los parámetros de prueba, incluidos los consumibles. Uno de los métodos más comunes de la American Society for Testing and Materials para evaluar la resistencia al desgaste abrasivo es la prueba estándar ASTM G65-04 para medir la abrasión utilizando arena seca / caucho. El abrasivo especificado es nominalmente 100% de sílice (SiO_2), tamizado a una malla 50/70.

Después de analizar 5 lotes de arena comercial para esta prueba se encontró que un lote de arena era diferente a los otros cuatro en términos de algunos aspectos geométricos o físicos, parámetro medido por la prueba de contenido de huecos. Esto lleva a la conclusión de que pequeñas variaciones en el contenido de huecos del abrasivo no contribuyen significativamente a los datos de tasa de desgaste. Las pruebas utilizadas en este proyecto indicaron que los cinco lotes de abrasivo eran muy similares [19].

En otro artículo publicado se trata sobre el diseño y construcción de una máquina para la medición del desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G65. El diseño toma como consideración lo expuesto por la norma y es complementado con metodologías de diseño y desarrollo de producto. En el diseño se establecen las especificaciones iniciales requeridas; para el diseño funcional se formulan las funciones que la máquina debe realizar para cada requerimiento, las alternativas de diseño son evaluadas por el método de criterios ponderados, permitiendo establecer la mejor alternativa de diseño conceptual y funcional. Por último, en la fase de diseño de detalle se definen

los materiales y el dimensionamiento de las piezas estableciendo un factor de seguridad en los elementos que ameriten [3].

En el trabajo con nombre “Movimiento de partículas y modos de desgaste en la prueba de abrasión con rueda de caucho y arena seca” se menciona que las partículas de arena pueden moverse libremente entre la rueda y la pieza de prueba y esto registrará los modos de deformación de la muestra y por tanto los mecanismos dominantes de desgaste. El estudio demostró que los patrones de movimiento de las partículas abrasivas a través del espacio en la prueba están en función de la carga aplicada y dureza del material bajo prueba.

Ha sido demostrado que el deslizamiento de partículas se ve favorecido por la alta aplicación de cargas y alta dureza de la probeta. La mecánica del contacto entre la partícula y la rueda de goma se ha abordado modificando el modelo al considerar el efecto de una mayor carga aplicada en las ecuaciones de momento sobre las que se construye el modelo, esta modificación al modelo es de naturaleza cualitativa, y en el futuro, debe desarrollarse un modelo robusto que describa el movimiento de partículas, que en particular aborde el detalle de la mecánica de contacto entre partículas y ruedas de caucho [20].

En el artículo “Abrasión de acero dulce en condiciones húmedas y secas con aparato de abrasión de rueda de caucho y acero” se realiza un estudio de los efectos del agua al ser usada para lubricar el contacto entre las partículas y la pieza de prueba. Especialmente en partículas pequeñas y redondeadas la tasa de desgaste se reduce, con partículas más grandes, la presencia de agua todavía afecta el desgaste, ya que puede favorecerse la abrasión de dos cuerpos y reducción de la incrustación de partículas. La rueda de acero tiende a producir más fragmentación de abrasivos, pero en el ambiente húmedo, esto es reducido ya que el contacto lubricado con la pieza de prueba da como resultado tensiones más bajas en las partículas.

Se ha demostrado que el papel del agua es significativo tanto en las pruebas de ruedas de caucho como en las de acero y afecta el movimiento de las partículas y fragmentación según el tipo, la forma y el tamaño de las partículas. y, por tanto, tiene un fuerte efecto sobre las tasas de desgaste y los mecanismos observados.

Las condiciones empleadas en una prueba utilizada para simular condiciones de servicio deben elegirse cuidadosamente para imitar las últimas condiciones lo más fielmente [21].

En el trabajo “Desarrollo de la prueba de abrasión con rueda seca de caucho” se desarrolla una máquina de abrasión de rueda de caucho con algunas ventajas sobre el diseño descrito en la norma.

En el nuevo diseño, la muestra se mantuvo horizontalmente, por lo tanto, fue posible determinar la masa real, velocidad angular del abrasivo que desgasta el espécimen y, en consecuencia, el número de partículas en la zona de contacto y la carga transportada por cada partícula.

El sistema de alimentación de abrasivo fue diseñado para mejorar el control sobre las condiciones en la región de contacto. El rendimiento del aparato se evaluó con probetas de bajo contenido de carbono, acero (AISI 1020), con ruedas de poliuretano fundido y caucho de clorobutilo. Las influencias de la carga, la velocidad de deslizamiento y la dureza del caucho fueron investigadas. Se midieron los aumentos de temperatura de la rueda, la muestra y la arena, y la fuerza de fricción; el principal mecanismo de disipación de calor fue a través del flujo continuo de abrasivo fresco que pasó por la muestra.

Se encontró que el coeficiente de fricción es independiente de velocidad de deslizamiento y carga aplicada. También era independiente de la dureza del caucho y el tipo de caucho.

Los aumentos de temperatura en la prueba pueden ser grandes y suficientes para causar cambios significativos en las propiedades mecánicas de la goma [22].

2.3 Análisis de contacto tribológico presente en una máquina de abrasión por rueda de caucho

En 2005 se presenta el trabajo de tesis de Jairo Castro, el proyecto consiste en la elaboración de un programa en Matlab, que permita determinar de manera general la incidencia de los esfuerzos hertzianos en elementos de máquinas que presenten contacto superficial, que permitan realizar un diagnóstico apropiado de las causas que originan las fallas de estos elementos y realizar las labores correctivas correspondientes, con el fin de disminuir el desgaste, la fricción, la adhesión, fractura y mejorar los sistemas de lubricación.

También es utilizado el software COSMOS/M y analizando los resultados obtenidos, se concluye que los resultados en Matlab para piezas con más de dos materiales involucrados, no son muy precisos, pero permiten obtener de forma rápida un valor aproximado de los esfuerzos de contacto sin la necesidad de emplear varias horas en el análisis y modelación de un problema en COSMOS/M [23].

La interacción de contacto entre un cuerpo cilíndrico rugoso y un plano liso deformable se investigó mediante el análisis de elementos finitos en el trabajo titulado “Análisis de contacto elasto-plástico cilindro-plano” El análisis incluyó tanto la deformación elástica-plástica como la fricción. Además, fueron investigados los efectos de varios parámetros de superficie rugosa sobre el área de contacto y al aumentar la carga.

El área de contacto de la superficie rugosa es más pequeña que su contraparte de la superficie lisa, y esta disminución depende del número, radio, restricción y ubicación de las asperezas. El

comportamiento elástico del material da como resultado un área de contacto considerablemente más pequeña que la de comportamiento elástico-plástico. La evolución del área de contacto elástico-plástica con el aumento de la carga es de naturaleza compleja ya que la región se ensancha y/o profundiza con el aumento de la carga según el número, el radio y restricción de asperezas. El efecto de la restricción sobre la aspereza depende de su naturaleza. (es decir, de ambos lados o de un lado). Una vez investigados los efectos de todos los parámetros mencionados estos se grafican, o expresan en términos de ecuaciones siempre que sea posible [24].

En el trabajo titulado “Análisis numérico-experimental de un contacto estático entre dos rodillos” se obtiene el análisis y comparación de los esfuerzos aplicados en dos elementos cilíndricos mediante dos métodos diferentes. El primero de estos métodos fue un análisis por elemento finito, en donde se modelaron los elementos en dos dimensiones y el segundo fue una prueba de análisis experimental de esfuerzos por fotoelasticidad, que es una técnica de campo usada para medir deformaciones superficiales con precisión para determinar los esfuerzos en un elemento o estructura, en esta técnica se utilizan probetas de material birrefringente que se cargan y se analizan mediante un polariscopio. Encontrándose diferencias del 3 hasta 50 % entre ambos métodos aplicados, con lo cual da pasó a seguir desarrollando y mejorando las técnicas experimentales ya que esta depende mucho de la apreciación y experiencia del observador en el polariscopio [25].

En el artículo de 2012 “Análisis de esfuerzo de contacto en engranes rectos aplicando el criterio de Hertz con ingeniería asistida por computadora” se desarrolló una metodología para el análisis de esfuerzos de contacto sobre la superficie de los dientes de un engrane recto considerando los postulados Hertz y de Buckingham como criterios principales modelando su desarrollo por medio de la ingeniería asistida por computadora. Se analizan diferentes modelos de engranes bajo condiciones de diseño y de carga distintas mostrando un análisis comparativo de resultados con los obtenidos bajo las normas AGMA (American Gear Manufacturers Association).

Los esfuerzos de contacto obtenidos con los estudios realizados por medio de las simulaciones numéricas aplicando CAE y los esfuerzos según las normas AGMA fueron muy similares, no obstante, ambas presentan condiciones que debemos tener en cuenta para un análisis confiable y un diseño seguro, sin embargo, ambas metodologías son válidas ya que AGMA sigue vigente para los diseñadores y CAE empieza a tomar fuerza debido al avance continuo de los sistemas computacionales y de los programas de diseño comerciales [26].

En un trabajo desarrollado en 2014, se investiga y compara experimentalmente el contacto elastoplástico de un cilindro contra una superficie plana. con las predicciones obtenidas con un marco de contacto de elementos finitos propuesto recientemente. El análisis se realiza para tres materiales diferentes e incluye todas las etapas de deformación que van desde el contacto hertziano

elástico hasta deformación elastoplástica a deformación finita por contacto plástico. Se presenta el comportamiento de la presión a lo largo de la longitud del contacto, así como la comparación entre los perfiles de muestras pronosticados y medidos. La evolución también se informa de la deformación plástica efectiva. Los resultados demuestran claramente la capacidad de la formulación de contacto para capturar el comportamiento del contacto elastoplástico de un cilindro contra una superficie plana que se observa experimentalmente [27].

En el artículo “Análisis de esfuerzos durante el contacto mecánico de materiales elásticos se calculan los esfuerzos resultantes en la región de contacto de dos materiales elásticos”, a través del método de elementos finitos. Estos resultados se comparan con ecuaciones analíticas del modelo de Hertz. Se consideran dos sistemas de contacto para analizar: cilindro contra cilindro y cilindro contra plano. Para definir estos sistemas se realiza un modelo en dos dimensiones. Para el análisis se considera ambos sistemas como un contacto no conforme. Para validar el modelo se comparan los resultados del sistema con valores teóricos.

Se observó que los resultados obtenidos de las simulaciones convergen rápidamente a un valor que se estabiliza a medida que se reduce el tamaño de la malla en la región de contacto, el valor mínimo de los elementos que se utilizó es de 0,1 mm. Por otro lado, de la comparación del Método de elementos finitos con las ecuaciones analíticas se encontró que los errores relativos en las medidas de presiones de contacto tienen un valor que se encuentra entre 1 y 2 por ciento. Los errores relativos en las medidas correspondientes al semiancho de la zona de contacto alcanzan valores de hasta 2 por ciento con respecto al valor que se determina a partir de las ecuaciones de Heinrich Hertz [28].

3. Marco Teórico

3.1 Tribología

La tribología es la ciencia y la tecnología de las superficies que interactúan en movimiento relativo entre sí. La naturaleza y las consecuencias de las interacciones que tienen lugar en la interfaz móvil y son controladas a partir de la fricción, desgaste y lubricación. Comprender la naturaleza de estas interacciones y resolver los problemas tecnológicos asociados con los fenómenos en las interfases móviles constituye la esencia de la tribología [1].

El estudio de la tribología requiere de una serie de disciplinas, incluida la ingeniería mecánica, ciencia de materiales, química de superficies, física de superficies y una multitud de materias, como caracterización de superficies, fricción, desgaste, lubricación, lubricantes y la selección y diseño de sistemas de lubricación, y constituye un elemento vital de la ingeniería [2].

Es importante que todos los diseñadores de sistemas mecánicos utilicen los medios adecuados para reducir la fricción y el desgaste, mediante la selección adecuada de rodamientos y la selección de los lubricantes y materiales para todas las superficies que interactúan. Es igualmente importante que aquellos involucrados con manufactura comprendan los orígenes tribológicos de la fricción no deseada, el desgaste excesivo y la falta de lubricación en su equipo. La falta de consideración de los fundamentos tribológicos en el diseño y la fabricación es responsable de grandes pérdidas económicas, incluida una vida útil más corta, un tiempo de inactividad excesivo del equipo, y grandes gastos de energía [2].

Se necesita el desarrollo de nuevos materiales, recubrimientos y tratamientos, y su desarrollo requiere una comprensión fundamental de los procesos tribológicos. Además, las nuevas aplicaciones industriales siguen evolucionando, pero existen muy pocos manuales de tribología, y éstos son antiguos y se han centrado en la tribología convencional, los materiales tradicionales y operaciones industriales ya anticuadas [2]. Por lo que es fundamental el desarrollo de máquinas y nuevas técnicas para estudiar los diferentes fenómenos que engloba el área de la tribología.

Cuando se ponen en contacto dos superficies nominalmente planas, la rugosidad de la superficie hace que se produzca puntos de contacto discretos y se produzca una adhesión interfacial [1]

La fricción es la resistencia al movimiento que se experimenta cuando un cuerpo sólido se mueve sobre otro. El desgaste es el daño superficial o la eliminación de material de una o ambas superficies sólidas en contacto. Para controlar la fricción y el desgaste se utilizan materiales, revestimientos y tratamientos superficiales [1]

Uno de los medios más eficaces para controlar la fricción y el desgaste es la lubricación adecuada, que proporciona un funcionamiento suave y una vida útil satisfactoria a los elementos de la máquina. Los lubricantes pueden ser líquidos sólidos o gaseosos. El papel de la rugosidad de la superficie, los mecanismos de adhesión, fricción y desgaste y las interacciones físicas y químicas entre el lubricante y las superficies que interactúan, juegan un papel fundamental en el alargamiento de la vida útil de los mecanismos, lo cual se traduce en un gran ahorro económico [1].

3.2 Desgaste

El desgaste es el daño superficial o la eliminación de material de una o ambas superficies sólidas que se encuentran en un movimiento de deslizamiento, rodadura o impacto en relación con el otro. En la mayoría de los casos, el desgaste se produce por interacciones de una superficie con las asperezas de la otra. El movimiento relativo entre dos superficies, en un inicio, puede causar remoción de material de una superficie y después ser transferido a la otra o puede desprenderse como una partícula de desgaste. En el caso de transferencia de una superficie a otra, el volumen neto o la pérdida de masa de la interfaz es cero, aunque una de las superficies está desgastada. El daño por desgaste precede a la pérdida de material, aunque también puede producirse de forma independiente [1].

El desgaste, al igual que la fricción, no son una propiedad del material, sino una respuesta del sistema. A veces se asume erróneamente que las interfaces de alta fricción presentan altos índices de desgaste. Esto no es necesariamente cierto. Por ejemplo, las interfaces con lubricantes sólidos y polímeros presentan una fricción relativamente baja y un desgaste relativamente alto, mientras que las cerámicas presentan fricción moderada pero un desgaste extremadamente bajo.

El desgaste puede ser bueno o malo. Ejemplos donde el desgaste es productivo se pueden encontrar en el mecanizado y el pulido donde el desgaste es controlado. Por otro lado, en casi todas las aplicaciones de las máquinas, como rodamientos, juntas, engranajes y levas podemos decir que la presencia del desgaste es indeseable. Los componentes pueden necesitar ser reemplazados después de que se haya eliminado una cantidad relativamente pequeña de material o si la superficie es excesivamente rugosa. En los sistemas tribológicos bien diseñados, la eliminación de material es un proceso muy lento, pero constante [1].

3.2.1 Tipos de desgaste

3.2.1.1 Desgaste por adhesión

El desgaste por adhesión se produce cuando dos cuerpos sólidos nominalmente planos están en contacto de deslizamiento, ya sea lubricado o no. La adhesión (o unión) se produce en los contactos

de aspereza en la interfaz, y estos contactos se cortan por deslizamiento, lo que puede resultar en el desprendimiento de un fragmento de una superficie y la unión con la otra superficie. A medida que el deslizamiento continúa, los fragmentos pueden salir de la superficie en la que se transfieren y ser transferidos de nuevo a la superficie original, o bien formar partículas de desgaste sueltas. Algunas se fracturan por un proceso de fatiga durante la repetida acción de carga y descarga que resulta en la formación de partículas sueltas [1].

3.2.1.2 Desgaste por fatiga

Se ha observado fatiga en la base y superficie durante la aplicación de ciclos repetitivos y deslizamiento, respectivamente. Los repetidos ciclos de carga y descarga a los que se someten los materiales expuestos puede inducir la formación de grietas en la base o en la superficie, que eventualmente, después de un número crítico de ciclos, resultará en la ruptura de la superficie con la formación de grandes fragmentos, dejando grandes fosas en la superficie, también conocidas como picaduras. Antes de llegar a este punto (que pueden ser cientos, miles o incluso millones de ciclos), el desgaste se puede considerar insignificante en comparación con el desgaste causado por un mecanismo de adhesión o abrasivo, donde el desgaste causa un deterioro gradual desde el inicio de la carrera. Por lo tanto, la cantidad de material removido por el desgaste de la fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos del número de revoluciones o el tiempo antes de que se produzca el fallo por fatiga [1].

3.2.1.3 Desgaste por impacto

Dos amplios tipos de fenómenos de desgaste pertenecen a esta clasificación: el desgaste erosivo y el de percusión. La erosión puede ocurrir por chorros y corrientes de partículas sólidas, gotas líquidas, y la implosión de burbujas formadas en el fluido. La percusión se produce por impactos repetitivos de cuerpos sólidos. Los impactos repetitivos dan lugar a una pérdida progresiva de material sólido [1].

3.2.1.4 Desgaste químico (corrosivo)

El desgaste químico o corrosivo se produce cuando el deslizamiento tiene lugar en un entorno corrosivo. En el aire, el medio corrosivo más dominante es el oxígeno. Por lo tanto, el desgaste químico en el aire es generalmente llamado desgaste oxidativo. En ausencia de deslizamiento, los productos químicos de la corrosión (óxidos) formarían una película típicamente de menos de un micrómetro de grosor en las superficies, que tienden a frenar o incluso detener la corrosión, pero la acción de deslizamiento desgasta la película química para que el ataque químico pueda continuar. Por lo tanto, el desgaste químico requiere tanto de la reacción (corrosión) como del frotamiento.

La maquinaria que opera en un entorno industrial o cerca de la costa generalmente produce productos químicos (es decir, se corroe) más rápidamente que cuando está operando en un ambiente limpio [1].

3.2.1.5 Desgaste inducido por el arco eléctrico

Cuando un alto potencial está presente sobre una fina película de aire en un proceso de deslizamiento, una ruptura dieléctrica conduce a la formación de arcos eléctricos. Durante la formación de arcos, una densidad de potencia relativamente alta se produce en un período de tiempo muy corto. Se genera calentamiento causado por el efecto Joule debido a la alta densidad de potencia y por el bombardeo de iones del plasma sobre la superficie. Este calentamiento da lugar a una considerable fusión y posterior resolidificación, corrosión, dureza y cambios de fase, e incluso en la ablación directa del material. El arco causa grandes cráteres, y cualquier deslizamiento u oscilación después de que un arco corte o fracture las superficies dará como resultado abrasión de tres cuerpos. El arqueo puede así iniciar varios modos de desgaste que resultan en fallos catastróficos de la maquinaria [1].

3.2.1.6 Frotación y Corrosión por frotamiento

El frotamiento se produce cuando el movimiento oscilatorio de baja amplitud en la dirección tangencial tiene lugar entre las superficies de contacto, que están nominalmente en reposo. Esto es algo común, ya que la mayoría de la maquinaria está sujeta a vibraciones, tanto en tránsito como en operación. Básicamente, el frotamiento es una forma de desgaste de adhesión o abrasivo, donde la carga normal causa la adhesión entre las asperezas y el movimiento oscilatorio causa rupturas, lo que resulta en un desgaste. Lo más común es que el desgaste se combine con la corrosión, en cuyo caso el modo de desgaste se conoce como corrosión por frotamiento. Las superficies sometidas a desgaste por frotamiento tienen un aspecto característico con manchas de color rojo-marrón sobre los metales ferrosos y las áreas adyacentes que están altamente pulidos debido a la calidad del lapeado [1].

3.2.1.7 Desgaste abrasivo

El siguiente método de desgaste es el causado por la abrasión, el cual será el principal a estudiar en este trabajo, este desgaste se produce cuando las imperfecciones de una superficie áspera y dura, o partículas duras se deslizan en una superficie más suave y dañan la interfaz por deformación plástica o fractura. En el caso de materiales dúctiles con alta resistencia a la fractura (por ejemplo, metales y aleaciones), las asperezas o partículas duras provocan el flujo plástico del material más

blando. La mayoría de las superficies metálicas y cerámicas durante el deslizamiento muestran claras evidencias de flujo plástico, incluso para algunos materiales cerámicos quebradizos.

En el caso de materiales frágiles con baja resistencia a la fractura, el desgaste se produce por la fractura frágil. En estos casos, la zona desgastada consiste en un agrietamiento significativo [1].

Hay dos situaciones generales para el desgaste abrasivo (ver Figura 1), en el primer caso, una superficie es más dura que la otra (abrasión de dos cuerpos), por ejemplo, en el rectificado, el corte y el mecanizado; y en el segundo caso, la superficie dura es un tercer cuerpo, generalmente una pequeña partícula de abrasivo, atrapada entre las otras dos superficies que es lo suficientemente dura para ser capaz de desgastar una o ambas superficies de contacto (abrasión de tres cuerpos), por ejemplo, en el lapeado y pulido. En muchos casos el mecanismo de desgaste al principio es adhesivo, lo que genera partículas de desgaste que quedan atrapadas en el de la interfaz, lo que resulta en un desgaste abrasivo de tres cuerpos [1].

En la mayoría de las situaciones de desgaste abrasivo, el rayado (de la superficie más blanda, principalmente) se observa como una serie de ranuras paralelas a la dirección del deslizamiento (arado) [1].

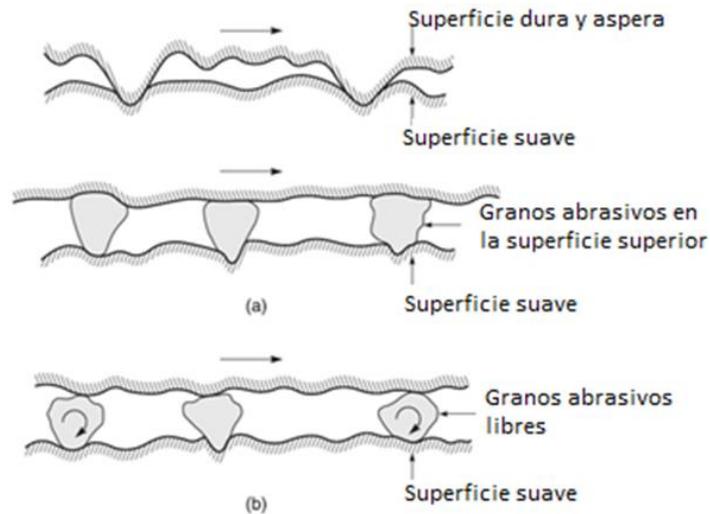


Figura 1. Esquemas de (a) una superficie dura y rugosa montada con granos abrasivos que se deslizan sobre una superficie más blanda, y (b) granos abrasivos que quedan atrapados entre la superficie con al menos una de las superficies más suave que los granos abrasivos [1].

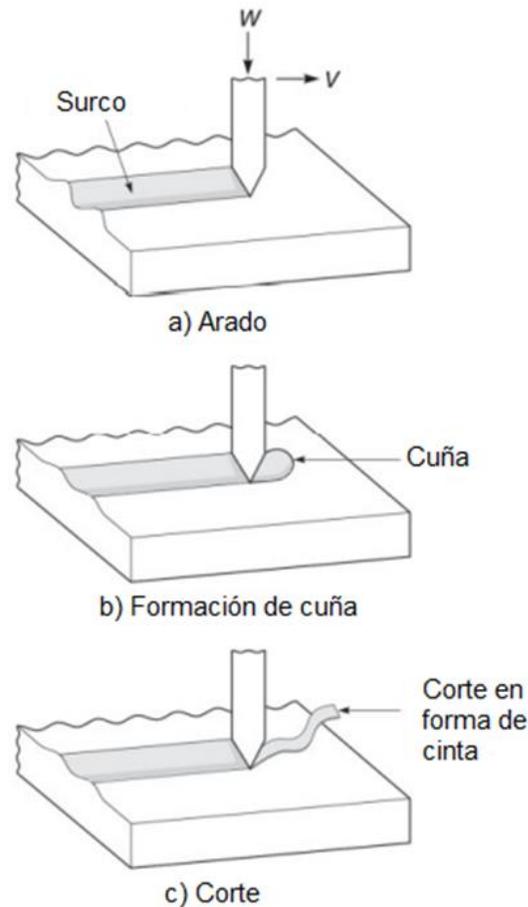


Figura 2. Modos de eliminación de material [1].

La eliminación de material de una superficie mediante la deformación plástica durante la abrasión puede producirse mediante varios modos de deformación que incluyen el arado, la formación de cuñas y el corte, como se muestra en la Figura 2.

El arado da lugar a una serie de surcos como resultado del flujo plástico del material más blando. En el proceso de arado, el material se desplaza desde una ranura hacia los lados sin que se elimine material, figura 2a. Sin embargo, después de que la superficie haya sido arada varias veces, la eliminación de material puede producirse por un mecanismo de fatiga de bajo ciclo. Cuando se produce el arado, se forman crestas a lo largo de los lados de las ranuras aradas, independientemente de que se formen o no partículas de desgaste. Estas crestas se aplanan y acaban fracturándose después de repetidos ciclos de carga y descarga. El proceso de arado también provoca una deformación plástica subsuperficial y puede contribuir a la nucleación de grietas superficiales y subsuperficiales. Las cargas y descargas provocan que estas grietas y los huecos preexistentes se propaguen paralelamente a la superficie a cierta profundidad y se unan a las grietas vecinas que finalmente cizallan hacia la superficie dando lugar a finas plaquetas de desgaste. En los metales

muy blandos, como el indio o el plomo, la cantidad de restos de desgaste producidos es pequeña y el material deformado es desplazado a lo largo de los lados de la ranura. Este proceso de desgaste por arado no debe confundirse con la fatiga por contacto de rodadura, que desarrolla picaduras macroscópicas y resulta debido a la iniciación de grietas de fatiga subsuperficiales de alto ciclo y baja tensión en el nivel en el que las tensiones elásticas hertzianas son máximas [1].

En el tipo de desgaste por formación de cuña, una punta abrasiva surca una ranura y desarrolla una cuña en su parte delantera. Por lo general, se produce cuando la relación entre la resistencia al cizallamiento de la interfaz y la resistencia al cizallamiento de la masa es alta (alrededor de 0.5-1). En esta situación, sólo una parte del material desplazado de la ranura se desplaza hacia los lados y el material restante aparece como una cuña, Figura 2b.

En la forma de corte del desgaste abrasivo, una punta abrasiva con gran ángulo de ataque surca una ranura y elimina el material en forma de partículas de desecho discontinuas o en forma de cinta, similares a las que se producen en una operación de corte de metales, Figura 2c. Este proceso da lugar a una eliminación generalmente significativa de material y el material desplazado en relación con el tamaño de la ranura es muy pequeño.

Los factores que controlan los tres modos de deformación son el ángulo de ataque o el grado de penetración, y la resistencia al cizallamiento interfacial de la interfaz.

En el caso de una punta abrasiva afilada, existe un ángulo crítico para el que se produce una transición desde el arado y la formación de cuñas hasta el corte. Este ángulo crítico depende del material abrasión [1].

Ecuación cuantitativa

Para obtener una expresión cuantitativa del desgaste abrasivo, consideramos un modelo simplificado, en el que una superficie consiste en un conjunto de asperezas cónicas duras que se deslizan sobre una superficie más suave y plana y generan un surco de profundidad uniforme, con un ángulo de rugosidad (o ángulo de ataque) θ [1].

El volumen total de material desplazado por todas las asperezas es:

$$v = \frac{2Wx \tan \theta}{\pi H} \dots\dots(1)$$

Donde $\tan \theta$ es un promedio ponderado de los valores de $\tan \theta$ de todas las asperezas cónicas individuales, llamado el factor de rugosidad, H es la dureza de la superficie más blanda y W es la carga normal aplicada y x es la distancia del volumen desplazado.

La derivación de la Ecuación (1) se basa en un modelo extremadamente simple. Por ejemplo, la distribución de las alturas y formas de las asperezas y cualquier acumulación de material por delante de las asperezas no se tienen en cuenta [1]. Una ecuación de la forma similar a la Ecuación (1) se encuentra para cubrir una amplia gama de situaciones abrasivas, y es:

$$v = \frac{k_{abr} W x}{H} \dots\dots(2)$$

donde k_{abr} es un coeficiente de desgaste no dimensional que incluye la geometría de las asperezas ($\tan \theta$ para un caso simple de asperezas cónicas) y la probabilidad de que determinadas asperezas corten (remover) en lugar de generar un surco. Por lo tanto, el efecto de la rugosidad en el volumen de desgaste es muy distinto.

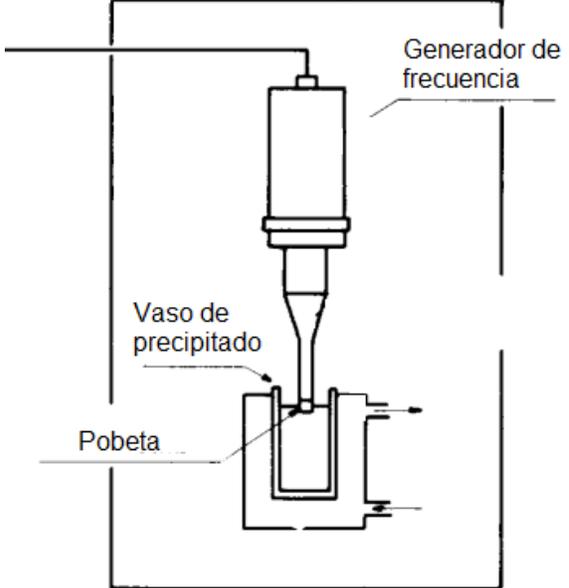
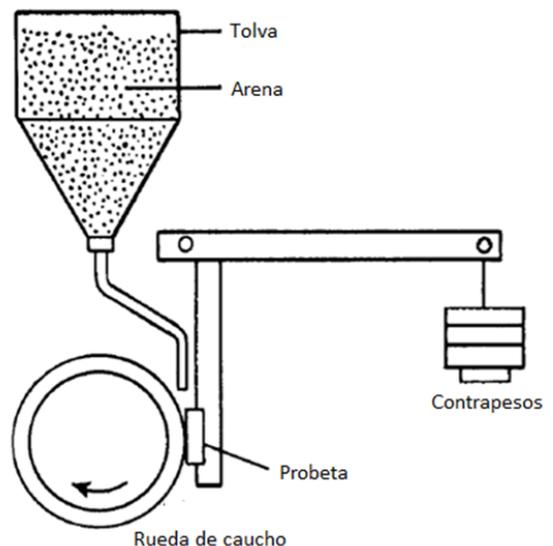
El valor de k_{abr} típicamente oscila entre 10^{-6} y 10^{-1} . La tasa de desgaste del abrasivo es frecuentemente muy grande, dos o tres órdenes de magnitud más grande que el desgaste por adhesión [1].

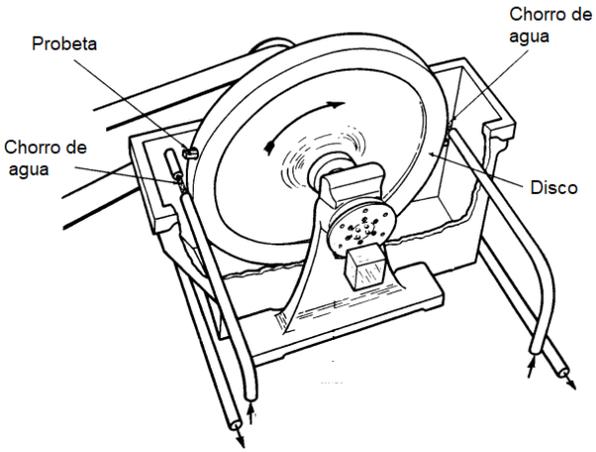
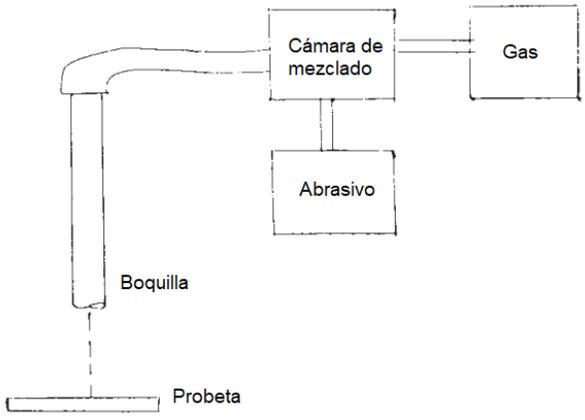
Durante el desgaste, se produce un embotamiento de las asperezas duras o de las partículas abrasivas, reduciendo así la tasa de desgaste. Sin embargo, una partícula abrasiva quebradiza puede fracturarse, lo que daría lugar a el reafilado de los bordes de la partícula y el aumento de la tasa de desgaste [1].

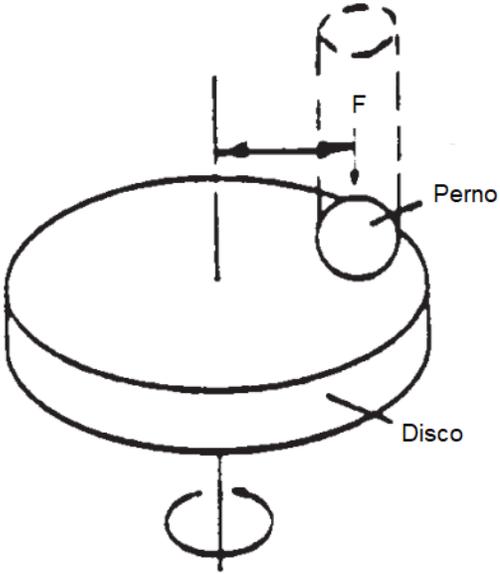
3.3 Ensayos de desgaste

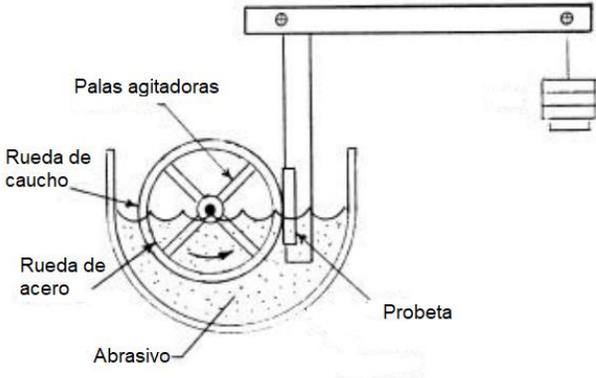
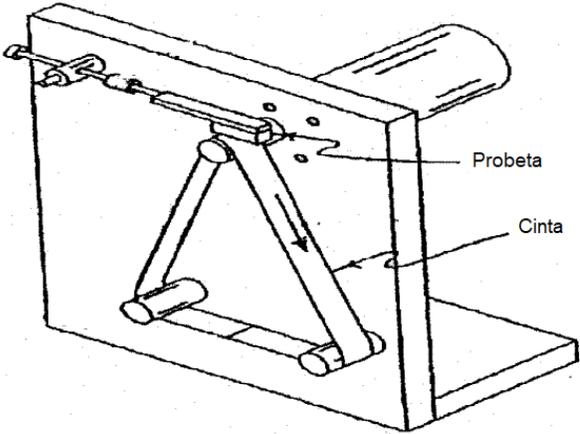
En la tabla 1 se muestra un resumen de los principales ensayos de desgaste normalizados por la ASTM.

Tabla 1. Resumen ensayos de desgaste.

Ensayos de desgaste normalizados por la ASTM			
Norma ASTM	Denominación	Descripción	Configuración
G-32	Métodos de ensayo de erosión por cavitación utilizando dispositivo vibratorio	Determinación del daño y pérdida de masa causada por cavitación en la cara de una muestra que se hace vibrar a alta frecuencia mientras está sumergida en un líquido. La vibración induce la formación y el colapso de cavidades en el líquido, y el colapso de cavidades que colapsan producen el daño y la erosión [29].	 <p>El diagrama ilustra el montaje para un ensayo de erosión por cavitación. Un generador de frecuencia está conectado a un sistema de ultrasonido que vibra una probeta sumergida en un vaso de precipitado. El líquido dentro del vaso experimenta la formación y el colapso de cavidades que erosionan la superficie de la probeta.</p>
G-65	Ensayos de abrasión por rueda caucho y arena seca.	El objetivo de esta prueba es clasificar los materiales por su resistencia al rayado por abrasión, bajo condición de abrasión de tres cuerpos. Los resultados se presentan a razón de la tasa de pérdida de volumen de la probeta [30].	 <p>El diagrama muestra el montaje para un ensayo de abrasión por rueda de caucho. Una tolva llena de arena permite que el material caiga sobre una probeta que gira sobre una rueda de caucho. El sistema está equilibrado mediante un brazo con contrapesos.</p>

G-73	Ensayo de erosión por impacto de líquido	<p>Esta práctica se refiere a los ensayos en los que las muestras sólidas son erosionadas o dañados por impactos repetidos y discretos de gotas o chorros de líquido.</p> <p>El objetivo de los ensayos puede es determinar la resistencia a la erosión [31].</p>	
G-76	Método de prueba estándar para realizar ensayos de erosión por impacto de partículas sólidas utilizando chorros de gas	<p>Se determina la pérdida de material debido a la erosión por impactos repetidos de partículas arrastradas por gas</p> <p>La norma fija las condiciones de ensayo y preparación de probetas [32].</p>	

G-77	Método de ensayo estándar para clasificar la resistencia de los materiales al desgaste por deslizamiento mediante el ensayo de desgaste de bloque sobre anillo.	Este método de ensayo cubre los procedimientos de laboratorio para determinar la resistencia de los materiales al desgaste por deslizamiento. El ensayo utiliza una máquina de ensayo de fricción y desgaste de bloque sobre anillo para clasificar materiales según sus características de desgaste por deslizamiento [33].	
G-99	Método de prueba estándar para pruebas de desgaste con un aparato de perno sobre disco	Este método sirve para determinar el desgaste de los materiales durante el deslizamiento utilizando un aparato de perno sobre disco. Los materiales se ensayan por pares en condiciones nominalmente no abrasivas. El espécimen del perno se presiona contra el disco con una carga especificada, por lo general mediante un brazo o palanca y pesos [34]	

G-105	Método de prueba estándar para realización del ensayo de abrasión con arena húmeda/rueda de caucho	El objetivo de esta prueba es clasificar los materiales por su resistencia al rayado por abrasión, bajo condición de abrasión de tres cuerpos en un medio acuoso. Los resultados se presentan a razón de la tasa de pérdida de volumen de la probeta [18].	
G-174	Método de ensayo estándar para medición de la resistencia a la abrasión de los materiales en un ciclo de contacto abrasivo	Este método de ensayo cubre la clasificación de los materiales a la resistencia a la abrasión por el roce con una cinta abrasiva de óxido de aluminio. Aunque la mayoría de los sólidos pueden ser ensayados, este método de ensayo se dirige a su uso para metales, y los revestimientos aplicados a los metales [35].	

3.4 Método de la prueba estándar para medición de la abrasión con rueda de caucho / arena seca

Este método de prueba cubre los procedimientos de laboratorio para poder determinar la resistencia de los materiales metálicos al rayado por abrasión mediante la prueba de rueda de goma / arena seca. La intención de este método de prueba es producir datos que sirvan para clasificar los

materiales en base a su resistencia a la abrasión por rayado, bajo un conjunto específico de condiciones.

Los resultados de la prueba de abrasión se informan como pérdida de volumen en milímetros cúbicos. Los materiales de mayor resistencia a la abrasión tendrán una menor pérdida de volumen [30].

3.4.1 Procedimientos

Este método de prueba cubre cinco procedimientos recomendados que son apropiados para grados específicos de resistencia al desgaste o espesor del material de prueba [30].

-Procedimiento A: Esta es una prueba relativamente severa que clasificará los materiales metálicos en una amplia escala de pérdida de volumen. Es particularmente útil en clasificación de materiales de resistencia a la abrasión media a extrema.

-Procedimiento B: Esta es una variación del Procedimiento A. Puede utilizarse para materiales altamente resistentes a la abrasión, pero particularmente útil en la clasificación de materiales con media y baja resistencia a la abrasión. El procedimiento B debe utilizarse cuando los valores de pérdida de volumen desarrollados por el Procedimiento A exceden 100 mm³.

-Procedimiento C: Igualmente es una variación del Procedimiento A para uso en recubrimientos finos.

-Procedimiento D: En este procedimiento se usa una carga más ligera que la del Procedimiento A (Tabla 2) que es particularmente útil para clasificar materiales de baja resistencia a la abrasión. También se utiliza para clasificar materiales de un tipo genérico o materiales que estarían muy cerca en las tasas de pérdida de volumen desarrolladas por el Procedimiento A.

-Procedimiento E: Es una variación del Procedimiento B que es útil en la clasificación de materiales con media o baja resistencia a la abrasión.

Tabla 2. Parámetros del ensayo [30].

Parámetros del ensayo			
Procedimiento	Fuerza aplicada a la probeta, N (lb)	Revoluciones de la rueda, rpm	Abrasión lineal, m (ft)
A	130 (30)	6000	4309 (14138)
B	130 (30)	2000	1436 (4711)
C	130 (30)	100	71.8 (236)
D	45 (10.1)	6000	4309 (14138)
E	130 (30)	1000	718 (2360)

3.4.2 Resumen del método de prueba

La prueba de abrasión con rueda de caucho / arena seca implica la abrasión de una muestra de ensayo estándar con un grano de tamaño y composición controlados. Se introduce el abrasivo entre la muestra de ensayo y una rueda giratoria con un vulcanizado de caucho de clorobutilo de una dureza especificada. La muestra se presiona contra la rueda giratoria, aplicando fuerza por medio de un brazo de palanca mientras un flujo controlado de arena desgasta la superficie de prueba. La rotación de la rueda es tal que su cara de contacto se mueve en la dirección del flujo de arena [30]. La duración de la prueba y la fuerza aplicada por el brazo de palanca varía según el procedimiento A al E (Tabla 2). Las muestras se pesan antes y después de la prueba y la pérdida de masa es registrada. Es necesario convertir la pérdida de masa en pérdida de volumen en milímetros cúbicos, debido a las grandes diferencias en la densidad de materiales [30].

La severidad del desgaste abrasivo en cualquier sistema dependerá según el tamaño, la forma y la dureza de las partículas abrasivas, la magnitud de la tensión impuesta por la partícula, y la frecuencia de contacto de la partícula abrasiva. En esta prueba estas condiciones se estandarizan para desarrollar una condición uniforme de desgaste que se ha denominado abrasión por rayado

El valor de esta prueba reside en la predicción de la clasificación relativa de varios en un entorno abrasivo. Dado que la práctica no intenta duplicar todas las condiciones del proceso (tamaño del abrasivo, presión, impacto o elementos corrosivos), no debería de utilizarse para predecir la resistencia exacta de un material determinado en un entorno específico. Su valor reside en predecir el comportamiento de los materiales en un orden relativo similar al que se produciría en un entorno abrasivo [30].

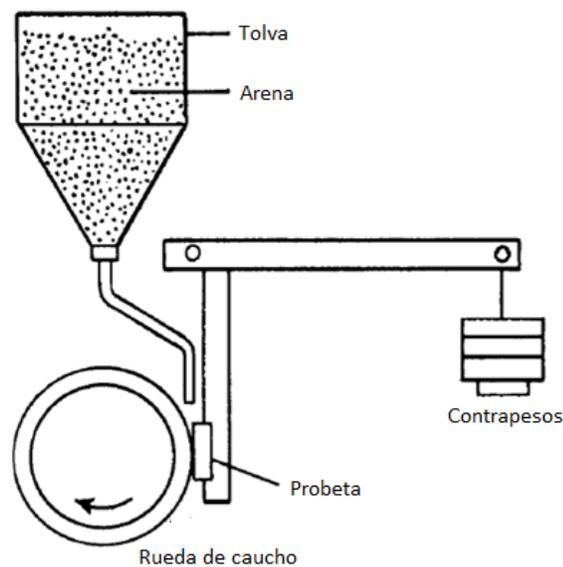


Figura 3. Diagrama de máquina para ensayos de abrasión [30].

3.4.3 Componentes principales

La Figura 3 muestra un diseño típico de una máquina de abrasión, varios elementos son de importancia crítica para garantizar la uniformidad de los resultados de las pruebas entre los laboratorios. Se trata del tipo de caucho utilizado en la rueda, el tipo de abrasivo y la forma, la posición y el tamaño de la abertura de la boquilla de arena, y un sistema de brazo de palanca adecuado para aplicar la fuerza requerida.

-Rueda de caucho: La rueda mostrada en la Figura 4 estará formada por de un disco de acero con una capa exterior de caucho de clorobutilo moldeada en su periferia. La dureza óptima del caucho curado será Shore A-60. Un rango de A58 a 62 es aceptable [30].

-Abrasivo: El tipo de abrasivo será una arena de grano de cuarzo redondeado, como la arena de prueba AFS 50/70. El contenido de humedad no deberá superar el 0.5 % en peso. El contenido de humedad puede determinarse midiendo la pérdida de peso después de calentar una muestra a aproximadamente 120°C (250°F) durante 1 h como mínimo. Si la arena de ensayo contiene una humedad superior al 0.5 % se secará calentándose a 100°C (212°F) durante 1 h como mínimo y se repetirá el ensayo de humedad. En zonas de alta humedad la arena puede almacenarse eficazmente en salas de temperatura y humedad constantes o en un contenedor de acero cerrado equipado con una bombilla eléctrica de 100 W [30].

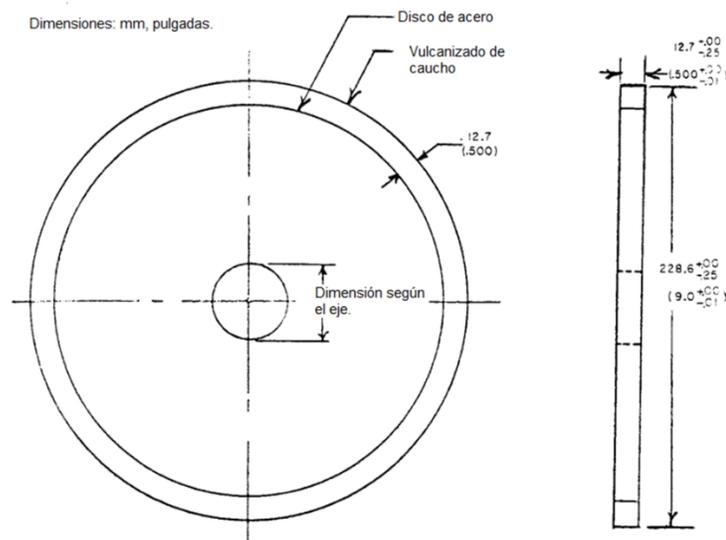


Figura 4. Dimensiones de rueda de caucho [30].

-Boquilla de abrasivo: La Figura 5 muestra el diseño de la boquilla que fue desarrollado para producir un flujo de arena preciso y en forma de cortina sobre la interfaz de contacto entre la probeta y la rueda. La boquilla puede ser de cualquier longitud conveniente que permita la conexión

a la tolva de arena mediante un tubo de plástico. En las boquillas nuevas, la velocidad de flujo de arena se ajusta rectificando el orificio de la boquilla para aumentar la anchura de la abertura para desarrollar un flujo de arena de 300 a 400 g/min. Durante la operación, la abertura de la boquilla debe situarse lo más cerca posible de la unión de la probeta con la rueda de caucho [30].

-Motor: La rueda es accionada por un motor eléctrico de 0.7 kW (1 hp) a través de una caja de engranajes 10/1 para garantizar la entrega de todo el par durante la prueba. La velocidad de giro de 200±10 rpm debe permanecer constante bajo carga. Se recomienda un control que tenga la capacidad de apagar la máquina después de un tiempo preseleccionado [30].

-Soporte de la muestra y brazo de palanca: El soporte de la muestra estará unido al brazo de palanca al que se le añaden pesas, para que se aplique una fuerza a lo largo de la línea diametral horizontal de la rueda. Se debe disponer de un número adecuado de pesas para aplicar la fuerza entre la probeta y la rueda según la Tabla 2. El peso real requerido no debe calcularse, sino que debe determinarse por medición directa de la carga [30].

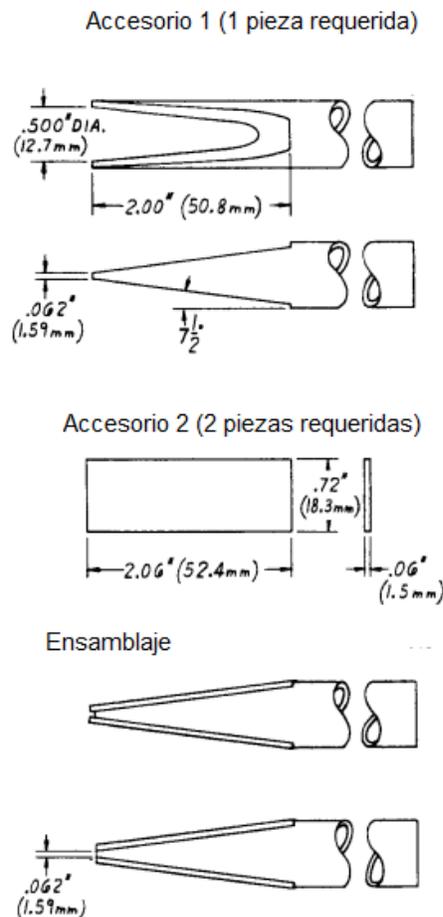


Figura 5. Diseño de boquilla [30].

3.4.4 Materiales de estudio

El objetivo de este método de ensayo es permitir el ensayo de abrasión de cualquier forma de material, incluyendo metales forjados, piezas de fundición, piezas forjadas, soldaduras de gas o eléctricas, depósitos de pulverización de plasma, metales en polvo, metalizados, electro placas, cermets, cerámicas, etc. El tipo de material determinará, en cierta medida, el tamaño total de la muestra de ensayo.

-La muestra típica tiene una forma rectangular de 25 por 76 mm (1.0 por 3.0 pulgadas) y con un grosor de entre 3.2 y 12.7 mm (0.12 y 0.50 pulgadas). El tamaño puede variar según las necesidades del usuario con la restricción de que la longitud y la anchura sean suficientes para mostrar la longitud total de la huella de desgaste tal y como se desarrolla en el ensayo. La superficie de prueba debe ser plana con las mínimas imperfecciones posibles.

-Para analizar depósitos de soldadura eléctrica o de gas se recomienda aplicar dos pases de soldadura en una superficie plana para evitar la dilución con el metal base. El calor de la soldadura puede distorsionar la probeta de ensayo. Cuando esto ocurre, la probeta puede ser enderezada mecánicamente o rectificada, o ambas cosas. Para desarrollar una huella de desgaste adecuada, la superficie a desgastar debe ser rectificada para producir una superficie lisa y nivelada de al menos 63.4 mm (2.50 pulgadas) de longitud y 19.1 mm (0.75 pulgadas) para el ensayo. Tenga en cuenta que la técnica del soldador, el aporte de calor de las soldaduras y el ajuste de la llama de las soldaduras de gas tendrán un efecto en la resistencia a la abrasión de un depósito de soldadura.

-Las muestras de ensayo deben ser lisas, planas y sin escamas. Los defectos superficiales como la porosidad y la rugosidad pueden alterar los resultados de los ensayos, por lo que deben evitarse tales muestras a menos que se investigue la propia superficie. Las superficies típicas adecuadas son las superficies laminadas, como las que se encuentran en el acero laminado en frío, los depósitos galvánicos y similares, las superficies rectificadas y las superficies finamente mecanizadas o fresadas [30].

3.4.5 Proceso

-Limpieza: Inmediatamente antes del pesaje, limpie la muestra con un disolvente o limpiador y séquela. Tenga cuidado de eliminar toda la suciedad o las materias extrañas presentes. Las muestras de acero que tengan magnetismo residual deben desmagnetizarse o no ser utilizadas.

-Pesaje: Pesar la muestra con una precisión de 0.001 g (0.0001 g para el procedimiento C).

-Sujeción: Asiente la muestra firmemente en el soporte y añada las pesas adecuadas al brazo de palanca para desarrollar la fuerza adecuada que presione la muestra contra la rueda. Esto puede

medirse con precisión mediante una escala de resorte que se engancha alrededor de la muestra y se tira hacia atrás para levantar la muestra de la rueda. Debe colocarse una cuña bajo el brazo de palanca para que la muestra se mantenga alejada de la rueda antes de comenzar el ensayo.

-Ajustar las vueltas o tiempo según el procedimiento a realizar.

-Flujo de arena y cortina de arena: La tasa de flujo de arena a través de las boquillas deberá estar entre 300 g (0.66 lb)/min y 400 g (0.88 lb)/min. No inicie la rotación de la rueda hasta que la cortina de arena sea uniforme y adecuada.

-El tiempo de permanencia entre las pruebas será el tiempo necesario para que la temperatura de la rueda de caucho vuelva a la temperatura ambiente. Para el procedimiento B, el tiempo de permanencia deberá ser de al menos 30 minutos.

-Inicie la rotación de la rueda e inmediatamente baje el brazo de palanca con cuidado para permitir que la muestra entre en contacto con la rueda.

-Cuando el ensayo haya realizado el número deseado de revoluciones de la rueda, levante la muestra para separarla de la rueda y detenga el flujo de arena y la rotación de la rueda. La tasa de flujo de arena debe medirse antes y después de un ensayo.

-Retire la muestra y vuelva a pesarla con una precisión de 0,001g (0,0001g para el procedimiento C).

- Huella de desgaste: Observe la huella de desgaste y compárela con fotografías de huellas de desgaste. Un patrón no uniforme indica una alineación incorrecta de la llanta de caucho con la muestra de ensayo o un desgaste desigual de la rueda de caucho. desgastada. Esta condición puede reducir la precisión del ensayo.

3.4.6 Cálculo de resultados

Los resultados del ensayo de abrasión deben reportarse como pérdida de volumen en milímetros cúbicos de acuerdo con el procedimiento especificado utilizado en el ensayo. Aunque los resultados de la pérdida de masa pueden utilizarse internamente en los laboratorios de ensayo para comparar materiales de densidades equivalentes, es esencial que todos los usuarios de este procedimiento de ensayo informen de sus resultados como pérdida de volumen en publicaciones o informes para que no haya confusión causada por las variaciones de densidad [30].

Convierta la pérdida de masa en pérdida de volumen de la siguiente manera:

$$volumen\ perdido\ mm^3 = \frac{masa\ pedida\ (g)}{densidad\ (\frac{g}{cm^3})} \times 1000 \quad \dots\dots (3)$$

Ajuste de la pérdida de volumen

A medida que la rueda de caucho disminuye su diámetro, la cantidad de abrasión por rayado desarrollada en una práctica determinada se reducirá en consecuencia. La pérdida de volumen real producida por estas ruedas ligeramente más pequeñas será, por tanto, inexacta. El valor de la "pérdida de volumen ajustada" tiene en cuenta este hecho e indica la tasa de abrasión real que se produciría con una rueda de 228.6 mm de diámetro. Calcule la pérdida de volumen ajustada de la siguiente manera:

$$AVL = \text{Ajuste de volumen perdido} \times \frac{228.6 \text{ mm (9.00 in)}}{\text{Diámetro actual de la rueda}} \dots\dots (4)$$

4. Metodología de diseño

4.1 Metodología de diseño empleada

Se utiliza la metodología de diseño propuesta por el autor Nigel Cross [5], dado que esta metodología toma criterios de otros autores y los conjuga para formar un método de diseño práctico y ordenado. Posteriormente se inicia con el análisis y simulación del diseño final con el apoyo de softwares de CAD y CAE. Con ayuda de esta metodología se logró seleccionar la mejor alternativa de diseño entre las generadas para las diferentes subfunciones, siempre cuidando que se cumpla con los objetivos y requerimientos propuestos, así como los indicados por la norma ASTM-G65. A partir del diseño conceptual desarrollado, se inicia con el diseño a detalle donde se calculan las dimensiones y seleccionan materiales para realizar la construcción del prototipo.

La principal razón de utilizar un método de diseño es sistematizar y seguir un método lógico que ayude a generar soluciones a los problemas presentes en el proceso de diseño, la metodología que se usará para el desarrollo de la máquina de ensayos de abrasión se compone de 6 etapas.

1. Clarificación de objetivos
2. Establecimiento de funciones
3. Fijación de requerimientos
4. Determinación de características
5. Generación de alternativas
6. Evaluación de alternativas

4.1.1 Clarificación de objetivos

La primera etapa es la clarificación de objetivos y como su nombre lo dice se tiene que clarificar los principales objetivos que debe cumplir el diseño, así como los secundarios, estableciendo la relación entre ellos en un árbol de objetivos como se muestra en la Figura 6.

Para esta primera parte se enlistan los objetivos existentes en la Tabla 3 y se ordenan en objetivos de nivel superior y de nivel inferior (Tabla 4).

El objetivo principal es realizar y completar satisfactoriamente un ensayo de abrasión bajo la norma ASTM G65, de donde se derivan objetivos en las funciones que debe tener como el paro automático y el mecanismo para iniciar y detener el flujo de arena, otro objetivo está en la operación que debe ser sencilla y de igual manera para el mantenimiento y reparación, por la parte de la manufactura esta debe tener un fácil ensamblaje, usar piezas comerciales y maquinados sencillos,

Tabla 3. Lista de objetivos.

Objetivos en:					
Funciones	Operación	Manufactura	Costos	Norma ASTM G65	Seguridad
<ul style="list-style-type: none"> -Realizar ensayos de abrasión por tres cuerpos (rueda de caucho, abrasivo y probeta). -Control de paro automático al finalizar la prueba. -Cumplir con los 5 procedimientos que indica la norma. -Mecanismo para iniciar y detener el flujo de abrasivo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil operación. -Fácil Mantenimiento. -Sin necesidad de un ambiente controlado para operar o una instalación especial donde será utilizado. -Fácil reparación, en caso de avería. 	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil ensamblaje. -Uso de piezas comerciales. -Disminuir la necesidad de maquinados especiales. 	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo costos de manufactura. -Bajo costo de insumos/consumibles para su operación. -Bajo consumo eléctrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Cumplir con los objetivos y delimitaciones de la norma, como: -Duración del ensayo. -Carga aplicada. -Se tienen que cumplir algunos parámetros tanto dimensionales como de potencia y velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Asegurar que no existan riesgos para el operador. -Brindar lo necesario para que esto suceda (procedimientos, equipo de seguridad, tolvas en el dispositivo, etc. -Protección para evitar daño del equipo. -Evitar fallas en la operación.

Tabla 4. Objetivos de nivel superior e inferior.

NIVEL SUPERIOR	NIVEL INFERIOR
<ul style="list-style-type: none"> -Realizar ensayos de abrasión según la Norma ASTM-G65 -Seguridad -Fácil operación -Bajo costo de operación / manufactura. 	<ul style="list-style-type: none"> -Protección para evitar daño del equipo -Control de paro automático al finalizar la prueba. -Cumplir con los 5 procedimientos que indica la norma -Fácil Mantenimiento -Sin necesidad de operar en un ambiente controlado -Sin necesidad de una instalación especial para operar. -Bajo costos de manufactura -Cumplir con los parámetros que establece la norma. -Asegurar que no existan riesgos para el operador -Brindar lo necesario para que esto suceda (procedimientos, equipo de seguridad, tolvas en el dispositivo, etc.)

en los costos se espera que sean bajos tanto para la construcción como en su operación (consumibles y demanda eléctrica), se tienen parámetros que delimita la norma como potencia, velocidad, flujo de abrasivo y algunas dimensiones, por último en cuestión de seguridad se va a cuidar la seguridad del operador y evitar daños al equipo.

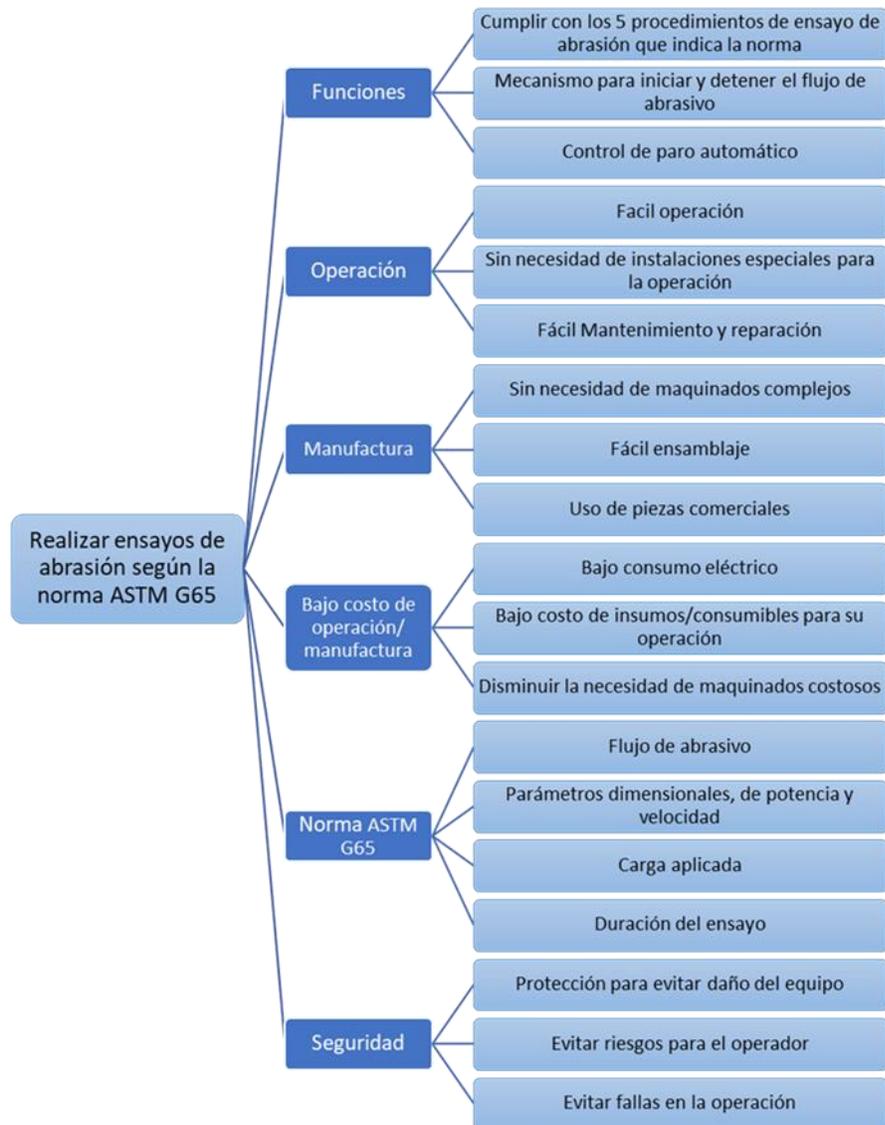


Figura 6. Árbol de objetivos.

4.1.2. Establecimiento de funciones

Aplicando la técnica de la caja negra (Figura 7), se representa como entrada la necesidad de realizar el estudio de abrasión a un material y se colocan las principales entradas necesarias para que esto suceda, a la salida se encuentra lo que se espera del diseño, que para este caso en específico es lograr satisfactoriamente un ensayo de abrasión bajo la norma ASTM G65, por lo que en la salida está la probeta ya desgastada y los residuos propios de la prueba.

A continuación se muestran las funciones secundarias (Figura 8) con el proceso y relaciones a seguir para cumplir la meta establecida, primeramente el diseño debe permitir colocar una probeta previamente maquinada, para después colocar la carga contra la rueda de caucho, según el procedimiento que se desee realizar, seguido de esto, se inicia el giro de la rueda y el flujo de

abrasivo, existirá la posibilidad de un paro de emergencia, si este no es activado, la rueda detendrá su giro automáticamente al cumplir con la distancia de abrasión indicada por la prueba y se procede a detener el flujo de abrasivo.

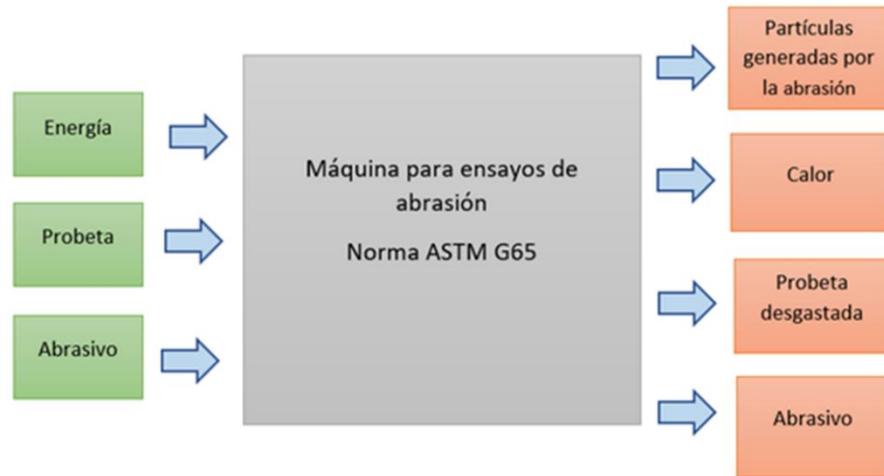


Figura 7. Caja negra.

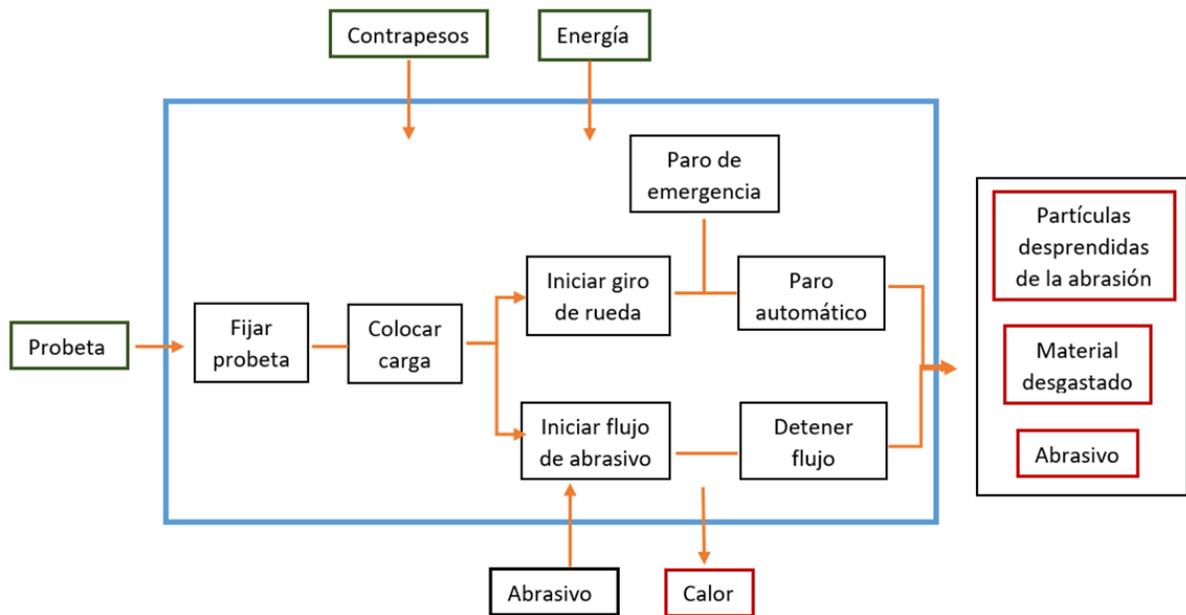


Figura 8. Caja transparente.

4.1.3 Fijación de requerimientos

Es importante fijar las especificaciones que requiere el diseño de la máquina para asegurar que cumpla su función y los objetivos esperados, hay requerimientos que necesariamente se tienen que cumplir, indicados con la letra (R) y otros que son deseados, indicados con la letra (D) como se muestra en la Tabla 5, es decir que se esperarían poder cumplirlos u obtener valores cercanos al propuesto.

Tabla 5. Fijación de requerimientos.

No.	R / D	Requerimientos
		Características de motor de acuerdo a la norma
	R	-Potencia 1hp
	D	-Reducción de RPM -10/1
	D	-Velocidad de 200 (+.10) rpm
	R	-1 solo sentido de giro
		Características de operación
	R	-Cumplir los 5 procedimientos que indica la norma
	D	-Fácil mantenimiento, sin necesidad de desarmar el equipo
	D	-Fácil reparación, que sea fácil de desarmar y cambiar componentes
	R	-Fácil operación, con procedimientos sencillos y apegados a la norma
	R	-Funcionamiento con energía eléctrica trifásica
	R	-Paro automático al finalizar la prueba
		Manufactura
	R	-Uso de piezas comerciales
	D	-Maquinados sencillos en torno y fresadora
	R	-Un ensamblaje sencillo para que se pueda montar y desmontar y así facilitar el transporte.
	R	-Bajo costo de producción, uso de materiales de fácil adquisición.
		Seguridad
	R	-Evitar daño al dispositivo, debe contar con un paro de emergencia
	R	-El diseño debe contar con guardas y lo necesario para garantizar la seguridad del operador
		Parámetros adicionales de acuerdo a la Norma ASTM G65
	R	-Dimensiones de la rueda de acero: 215 mm de diámetro 12.7 mm de espesor
	R	-Espesor del vulcanizado de caucho: 12.7 mm
	R	-Dureza de caucho: A58-A62
	R	-Flujo de abrasivo: 300 a 400 gr/min.
	R	-Dimensiones del soporte de la probeta: 1" x 3" x .12"-.5"
	R	-Transmitir la carga de 130 y 45 Newton (según el procedimiento) a la probeta
		Dimensiones, estética y peso
	D	Altura: 1.5m
	D	Ancho: 1 m
	D	Largo: 1.5 m
	R	Peso: Para el peso se debe considerar uno de tal manera que permita su traslado y manipulación
	D	Estética: Sin bordes en forma afilada, distribución uniforme de los diferentes elementos.

4.1.4. Determinación de Características.

Para este apartado se utiliza el método del “despliegue de la función de calidad (QFD)”, el cual tiene como finalidad traducir los requerimientos que busca el cliente en características de ingeniería, que sirvan para el desarrollo conceptual y a detalle del prototipo de la máquina. De este método se obtiene como resultado la matriz llamada “Casa de la calidad”, ver Figura 9. Se observa la relación entre los atributos deseables y las características de ingeniería que se esperan del diseño, con esto se establecen las metas que debe alcanzar el diseño para cumplir los requerimientos propuestos.

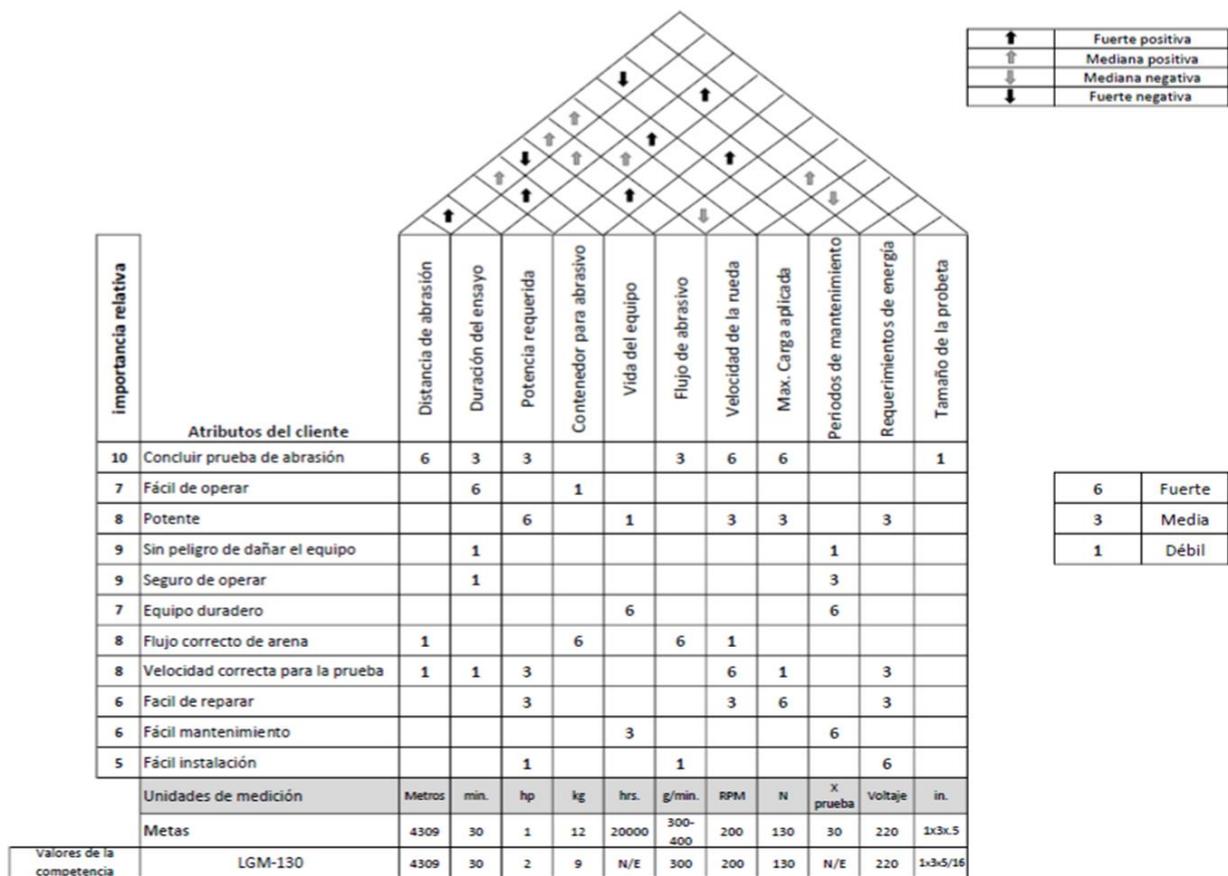


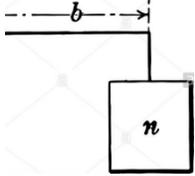
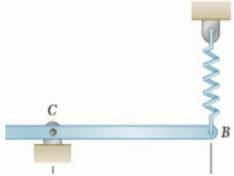
Figura 9. Casa de la calidad.

4.1.5 Generación de alternativas

Con ayuda de un diagrama morfológico (Tabla 6) se presentan las posibles alternativas de solución para diferentes sub-funciones que tendrá el diseño final, algunos ejemplos de estos planteamientos son; la manera en la que será sujeta la probeta para su estudio, ya sea por medio de un sistema de mordazas accionadas mecánicamente, o que este mismo sistema sea accionado hidráulicamente, y una última alternativa sería utilizar una abrazadera.

Otro listado de alternativas es el medio por el cual se va a transmitir la potencia a la rueda, una opción es por medio de un sistema de banda-polea, la segunda opción es con un sistema de piñón-cadena y por último con una flecha.

Tabla 6. Generación de alternativas.

5-Generación de alternativas			
Sub-funciones	1	2	3
Sujetar probeta	Mordazas mecánicas 	Mordazas hidráulicas 	Abrazadera 
Colocar la carga	Contrapesos por encima de la palanca 	Contrapesos colgantes 	Resorte 
Transmisión de potencia	Polea-Banda 	Piñón-Cadena 	Flecha 
Iniciar/detener el flujo de abrasivo	Llave de paso 	Compuerta 	Tapón roscado 
Método para finalizar la prueba	Paro manual 	Paro automático con timer 	Paro automático con control de PLC 
Paro de emergencia	Automático 	Manual 	Ambos 

4.1.6. Evaluación de alternativas

Las alternativas generadas en el apartado anterior tienen que ser evaluadas para seleccionar la opción más viable en función a la ponderación que tiene cada objetivo. En la Tabla 8 y 9 se muestra un par de ejemplos donde se comparan las alternativas en base a su rendimiento contra los objetivos ponderados, y así obtener un resultado numérico para cada una. La calificación se selecciona con ayuda de la Tabla 7.

La opción que obtenga el mayor puntaje es la elegida. Esta misma metodología se repite para las alternativas de las 5 sub-funciones restantes presentadas en la sección 4.1.5.

Tabla 7. Asignación de calificaciones.

Significado			Calificación
Bueno	Muy fácil	Muy elevado	5
Medianamente bueno	Fácil	Elevado	4
Mediana	Medianamente fácil	Medio	3
Medianamente malo	Medianamente difícil	Bajo	2
Malo	Difícil	Muy bajo	1

Tabla 8. Evaluación del mecanismo para sujetar la probeta.

Sujetar probeta			Mordazas mecánicas			Mordazas hidráulicas			Abrazadera		
Objetivo	Ponderación	Parámetro	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor
Sujeción firme	.5	Fuerza de agarre	Buena	5	2.5	Buena	5	2.5	Mediana	3	1.5
Fácil operación	.2	Sencillo de accionar	Medianamente fácil	3	.6	Muy Fácil	5	1	Difícil	1	.2
Bajo costo	.3	\$ (aprox.)	600	4	1.2	4000	1	.3	200	5	1.5
Suma					4.3						3.2

Tabla 9. Evaluación de alternativas de transmisión de potencia.

Transmisión de potencia			Polea-Banda			Piñón-Cadena			Flecha		
Objetivo	Ponderación	Parámetro	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor
Evitar pérdidas de potencia	.75	1 hp	Medianamente bueno	4	3	1hp (Buena)	5	3.75	1hp (Buena)	5	3.75
Confiabilidad	.25	Menor cantidad de elementos posibles	5 (Medianamente malo)	2	.5	4 (Mediana)	3	.75	3 (medianamente bueno)	4	1
Suma					3.5						4.75

4.1.7 Resultados de la metodología

A partir de las soluciones obtenidas en el apartado 4.1.6 de la metodología de diseño, se obtiene el resumen en la Tabla 10, en donde se muestran las opciones que mejor se adaptan a los objetivos planteados, con esto se puede comenzar a generar los primeros bosquejos o diseños conceptuales de lo que será el diseño final.

Tabla 10. Alternativas seleccionadas.

Sub-función	Alternativa ganadora
Sujetar probeta	Mordazas mecánicas
Colocar la carga	Contrapesos colgantes
Transmisión de potencia	Flecha
Iniciar/detener el flujo de abrasivo	Llave de paso
Método para finalizar la prueba	Paro automático con timer
Paro de emergencia	Manual

4.2 Diseño conceptual

El primer diseño conceptual generado es el conjunto de transmisión de potencia, un diseño conceptual inicial se muestra en la Figura 10, que después de un análisis y refinamiento se obtiene el diseño conceptual final, que como se observa en las Figuras 11 y 12 se compone de un motorreductor conectado a la flecha por medio de un acople flexible, la flecha es soportada por dos chumaceras, con una disposición diferente a la que se observa en la Figura 10, y en el extremo de la flecha se encuentra la rueda de acero, con el vulcanizado de caucho en el perímetro. También se observa el arreglo preliminar con el que se podrá fijar a la estructura.

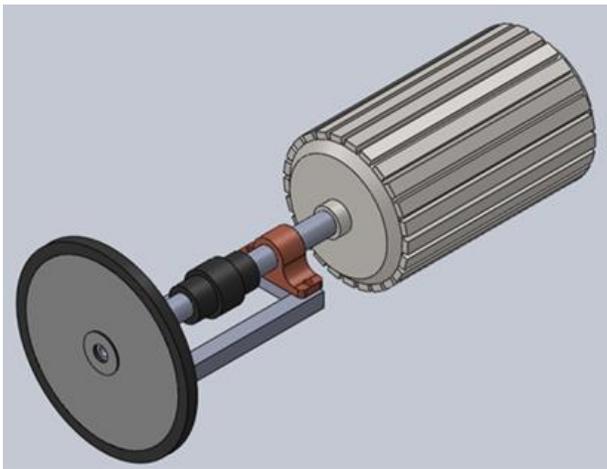


Figura 10. Diseño inicial del sistema de transmisión.

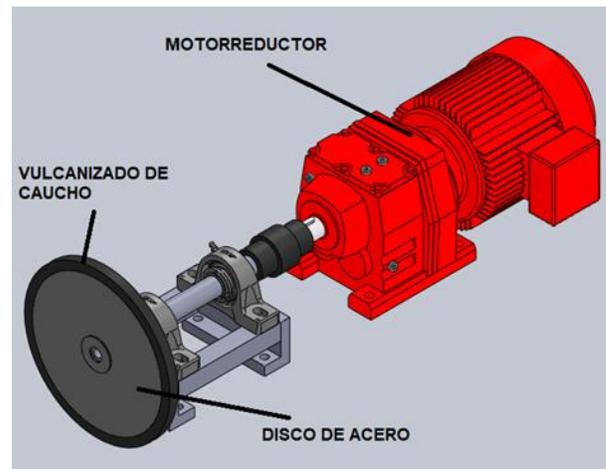


Figura 11. Sistema de transmisión, vista 1.

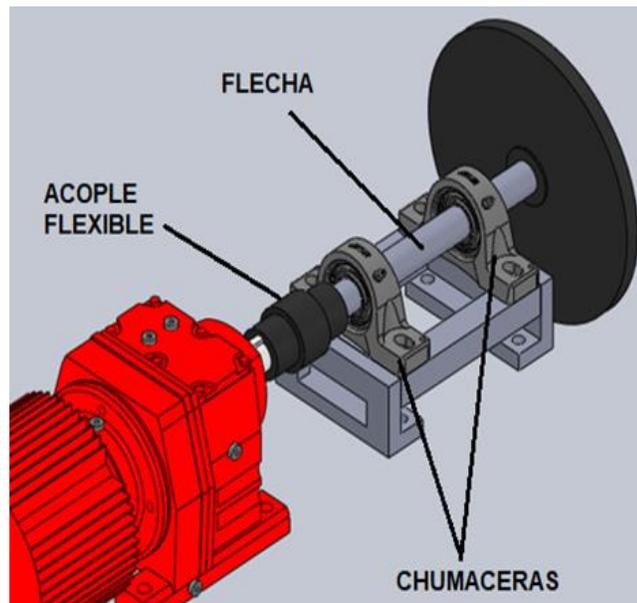


Figura 12. Sistema de transmisión, vista 2.

En la Figura 13 se muestra el diseño conceptual del sistema para transmitir la carga a la probeta, que se compone de la porta probeta con su sistema de mordazas mecánicas que se seleccionó anteriormente, la palanca para transmitir la carga y los contrapesos necesarios. En la Figura 14 se puede apreciar el diseño conceptual final, donde también se considera un apoyo para dar rigidez al sistema, una nueva ubicación del barreno que actuará como pivote y en el extremo una “oreja”, que servirá para sostener la palanca en una posición que permita la fácil colocación de la probeta.

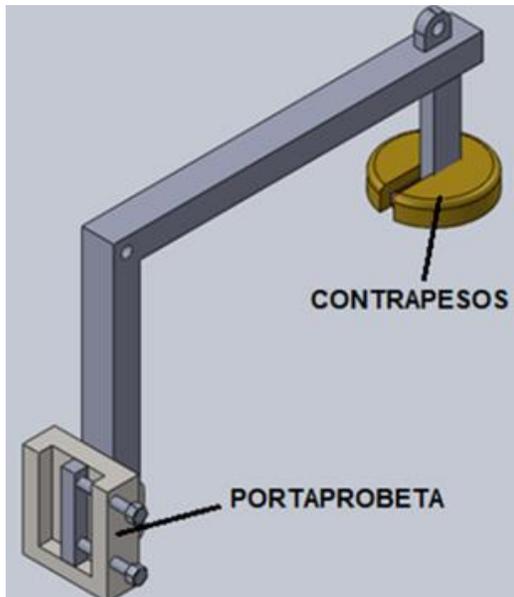


Figura 13. Diseño inicial de la palanca.

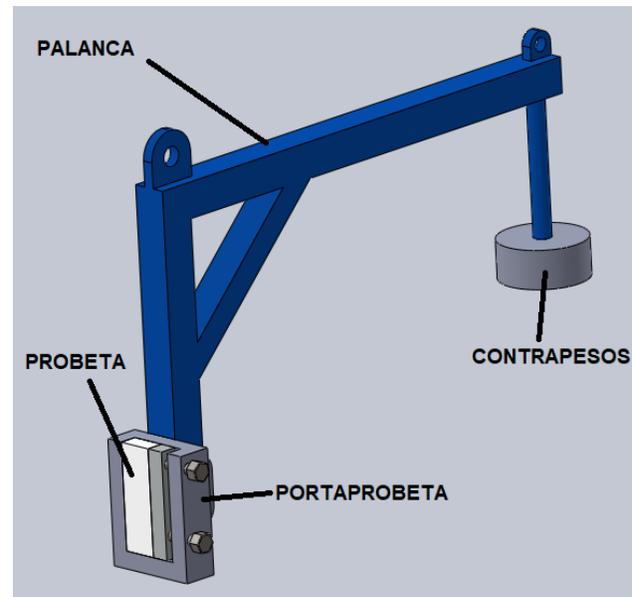


Figura 14. Diseño conceptual final de la palanca.

Se generó el primer diseño conceptual de la máquina el cual se muestra en la Figura 15, con la finalidad de tener una vista previa de la disposición de los diferentes elementos como lo es la tolva para contener el abrasivo, con el sistema de apertura y cierre ya seleccionado, también se encuentra el sistema de transmisión de potencia mostrado en la Figura 10 y el mecanismo de palanca y porta probeta de la Figura 13. De igual manera se indica la ubicación del sistema de control, donde se va a programar el paro automático del motor al finalizar la prueba, y adicionalmente un paro de emergencia.

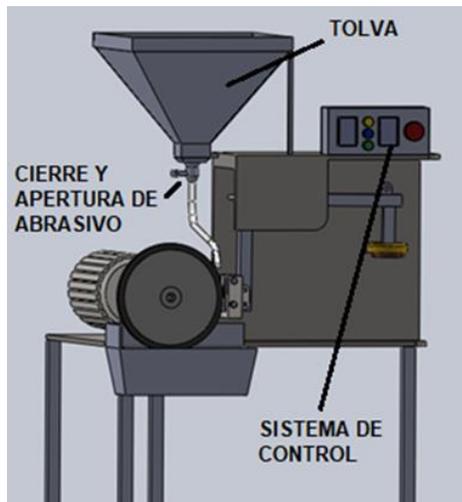


Figura 15. Máquina de abrasión.

En un diseño conceptual final (Figura 16) se puede observar el motorreductor (1), que proporciona la rotación al disco de acero recubierto de caucho (2) por medio de la flecha (3). Se colocan los contrapesos (4) necesarios en la palanca (5) para aplicar la carga entre la probeta (6) y el disco (2). El abrasivo se coloca en la tolva superior (7) y se deja pasar hacia la boquilla (8) por medio de una manguera (9) que en su inicio tiene una llave de apertura y cierre (10). Para iniciar y detener la prueba se cuenta con un sistema de control y un paro de emergencia (11) si es necesario. En la tolva inferior (12) se recolecta el abrasivo usado y los mismos residuos del proceso de abrasión. Todos los elementos se encuentran soportados por una estructura metálica (13).

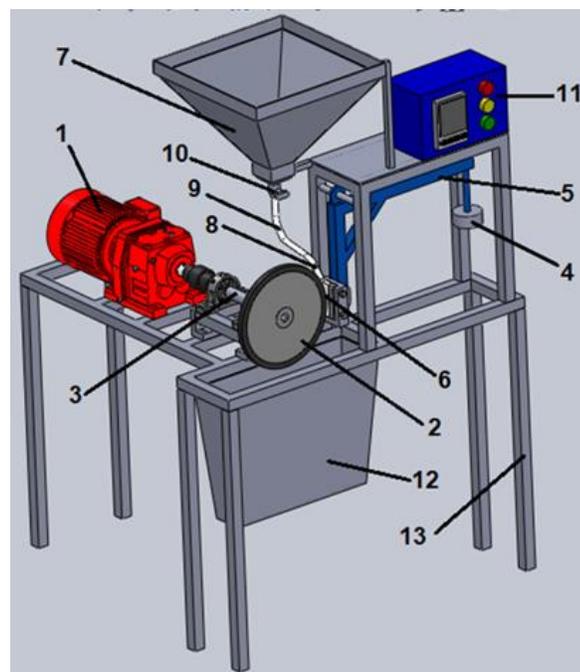


Figura 16. Diseño conceptual final.

5. Resultados

5.1 Diseño a detalle

Para un mejor análisis en el diseño a detalle, la máquina es dividida en 6 módulos:

1. Transmisión de carga

- Palanca
- Contrapesos
- Perno
- Base para sujeción de contrapesos

2. Porta probeta

- Base
- Mordaza
- Tornillos

3. Transmisión de potencia

- Motorreductor
- Flecha
- Chumaceras
- Acople flexible
- Disco de acero con vulcanizado de caucho
- Tornillos
- Tuercas y rondanas
- Cuñas

4. Estructura

- Perfil de aluminio
- Elementos de sujeción
- Tornillos
- Bases de acero
- Guardas de protección

5. Control

6. Tolvas

- Tolva superior
- Llave de paso

- Manguera
- Boquilla
- Tolva inferior
- Tornillos
- Tuercas y rondanas

5.1.1 Transmisión de carga

El primer módulo a analizar es el de transmisión de carga. Se comienza con un análisis estático de la palanca (Figura 17) para conocer todas las fuerzas presentes, en base a la norma ASTM G65, conocemos la fuerza máxima que se debe ejercer contra la rueda de caucho y de estudios ya realizados sabemos el coeficiente de fricción entre la rueda y la probeta es igual a .4 [22], con la finalidad de conocer la fuerza de fricción y agregarla al análisis.

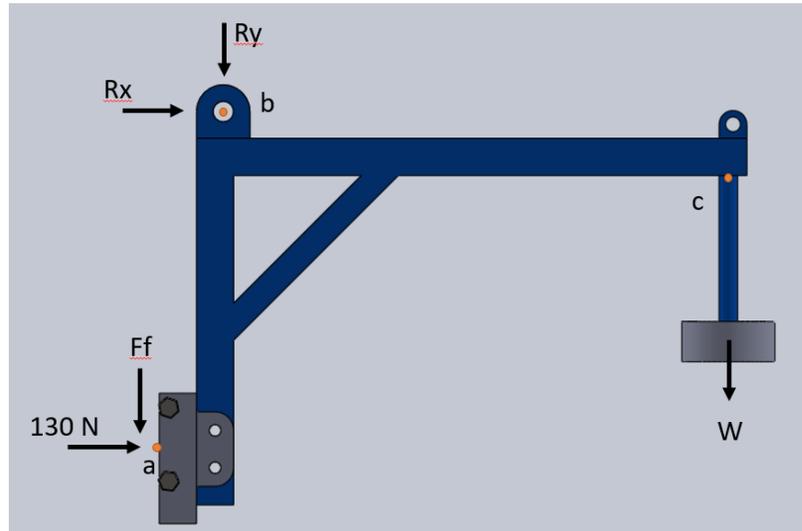


Figura 17. Análisis estático.

Distancia vertical ab= 200 mm

Distancia horizontal ab= 42 mm

Distancia horizontal bc= 420 mm

Para procedimiento A, B, C y E, con F=130 N.

$$F_f = \mu N \dots \dots \dots (5)$$

$$F_f = .4(130 N) = 52 N$$

A partir de $\sum M_b = 0$

$$W = 67.1 \text{ N}$$

A partir de $\sum F_x = 0$

$$R_x = 130 \text{ N}$$

A partir de $\sum F_y = 0$

$$R_y = 119.1 \text{ N}$$

Para procedimiento D, con $F=45 \text{ N}$.

$$F_f = \mu N = .4(45 \text{ N}) = 18 \text{ N}$$

A partir de $\sum M_b = 0$

$$W = 23.23 \text{ N}$$

A partir de $\sum F_x = 0$

$$R_x = 45 \text{ N}$$

A partir de $\sum F_y = 0$

$$R_y = 41.23 \text{ N}$$

De este mismo análisis podemos obtener el peso de los contrapesos necesarios para los 5 procedimientos diferentes que se pueden realizar con esta máquina de ensayos.

Para procedimiento A, B, C y E.

$$W = 67.1 \text{ N} = \mathbf{6.84 \text{ Kg.}}$$

Para procedimiento D.

$$W = 23.23 \text{ N} = \mathbf{2.37 \text{ Kg.}}$$

En el módulo de transmisión de carga se encuentra la palanca que soporta los contrapesos y el porta probeta, se realiza un análisis de este elemento, tomando en cuenta el peso de los contrapesos, así como su reacción en la probeta y la fuerza de fricción presente por el contacto con la rueda de caucho y la probeta, como se muestra en la Figura 17, el material que se propone es un perfil de PTR A36 grado B de 1.5x1.5 pulgada, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 250 MPa [36].

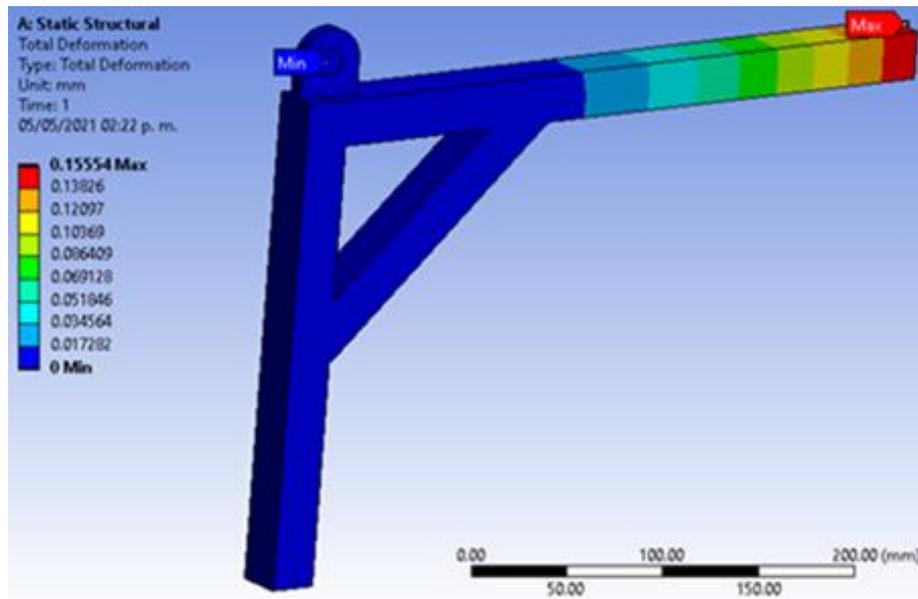


Figura 18. Deformación de palanca.

Como se observa en la Figura 18 la mayor deformación se encuentra presente en el extremo donde se colocan los contrapesos, se realizará un análisis para determinar si es necesario modificar el elemento de apoyo.

En la Figura 19 se muestra el análisis de esfuerzos, y como es de esperarse la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en el barreno, por donde pasa el perno y en las inmediaciones del elemento de apoyo, sin embargo, el valor máximo del esfuerzo es de 52.38 MPa, el cual no compromete la resistencia del elemento. Al compararlo con la resistencia a la fluencia obtenemos un factor de seguridad de 5.

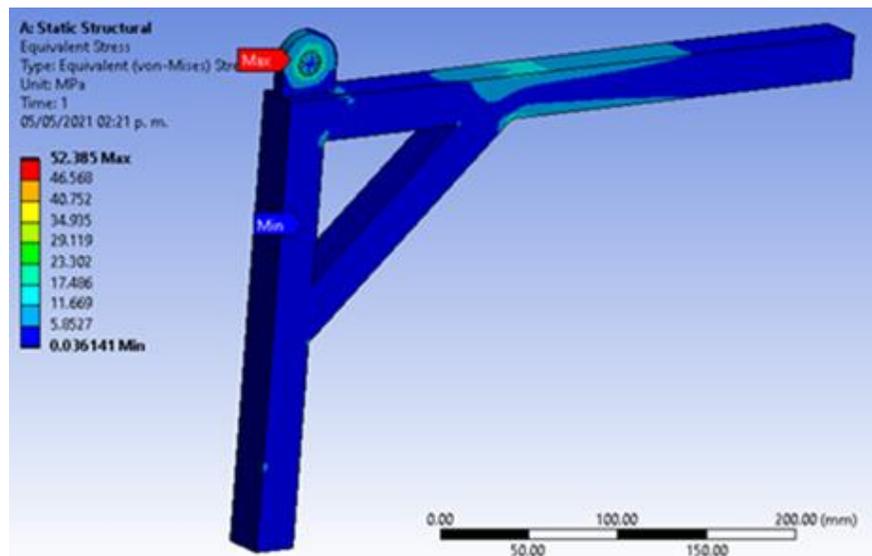


Figura 19. Esfuerzo en la palanca.

Con base a los análisis hechos se propone la nueva geometría mostrada en las Figuras 20 y 21, donde se alarga el brazo de apoyo, para tratar de disminuir al máximo la deformación. También se modifica la base para sostener los contrapesos por una “oreja” con un barreno para sostener el contrapeso, esto con la finalidad de que sea fácil colocarlo y la carga se mantenga vertical en todo momento. Por último, se modifica el soporte por donde pasa el perno, colocando dos soportes a los extremos, con la finalidad de distribuir la carga en el perno y evitar el giro lateral de la palanca.

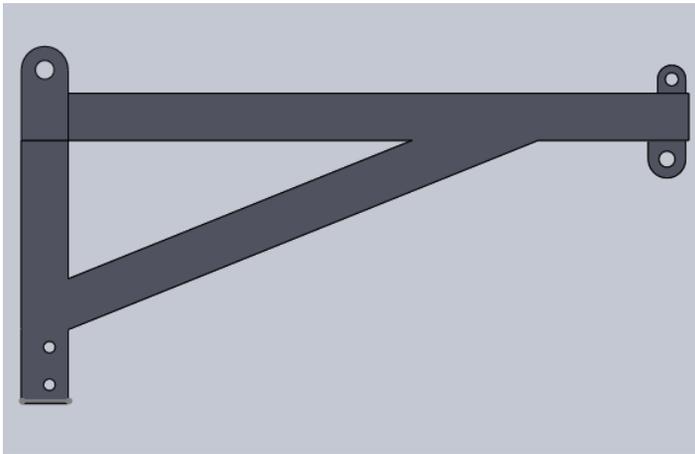


Figura 20. Palanca.

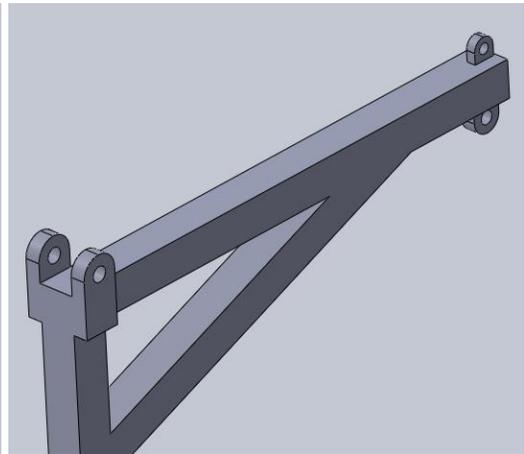


Figura 21. Soportes de la palanca.

Se realiza el nuevo análisis del elemento, colocando un bloque para simular la presencia del portaprobeta y probeta (Figura 22), para poder colocar las cargas presentes en esa zona.

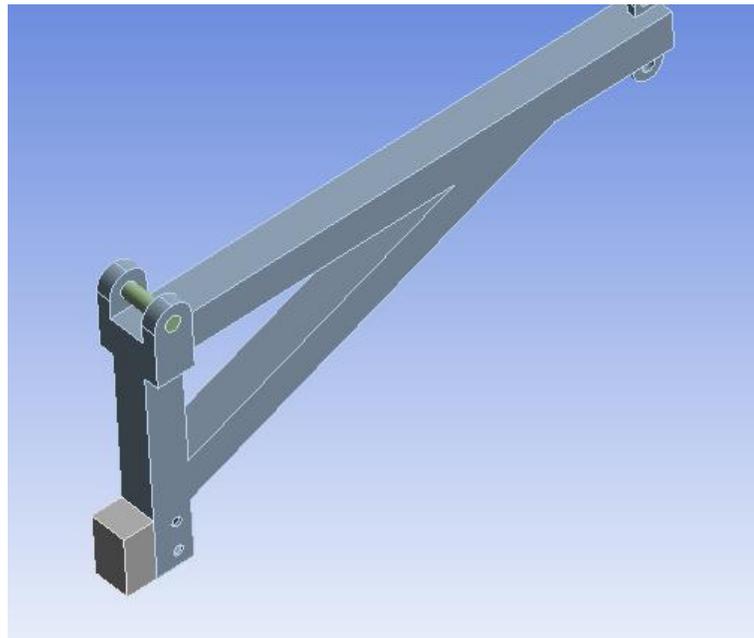


Figura 22. Simulación de la palanca.

En los resultados, se observa una considerable disminución de la deformación, mientras que en análisis de esfuerzo se observa una mayor distribución y por lo tanto el valor del máximo esfuerzo disminuyó hasta 13 MPa.

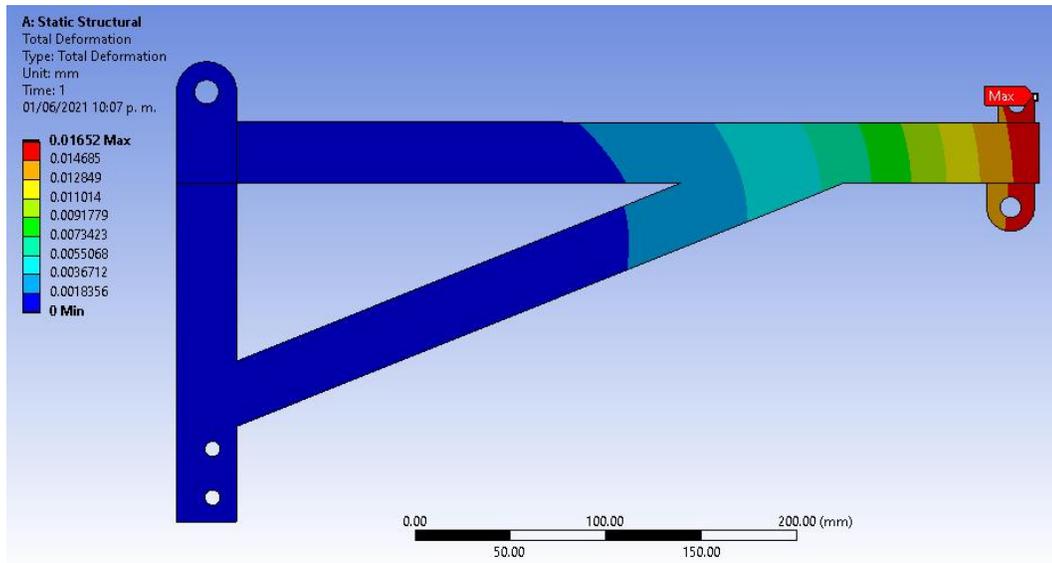


Figura 23. Deformación final en la palanca.

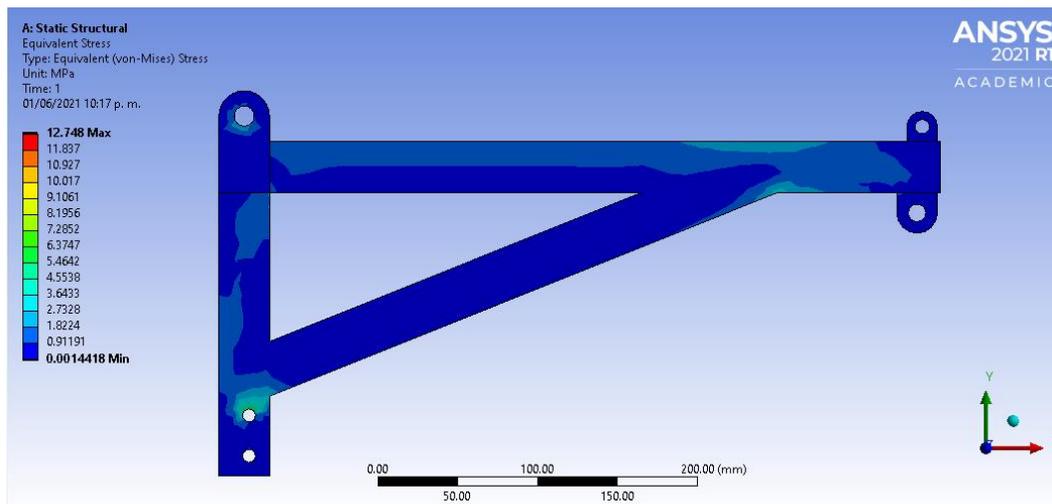


Figura 24. Esfuerzo final en la palanca.

Dentro del mismo módulo de la estructura se realiza un análisis del perno, dado que es uno de los elementos que presenta mayor concentración de esfuerzos. Este perno sostiene la palanca de transmisión de carga. Para este análisis se colocan las fuerzas presentes en el área de contacto con la palanca, y basado en el diseño conceptual, se considera una sección circular de 12.7 mm de acero cold rolled AISI 1018.

-Para este elemento se propone la geometría de la Figura 25, las dimensiones están dadas en mm y se analiza para determinar si soporta los esfuerzos.

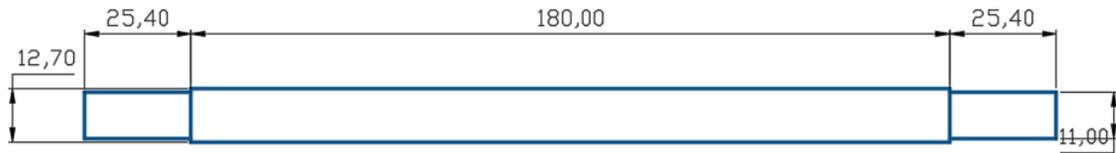


Figura 25. Dimensiones del perno.

Con base a la geometría propuesta y las fuerzas presentes se genera el diagrama de cuerpo libre (Figura 26) el diagrama de cortantes (Figura 27) y por último el diagrama del momento máximo presente (figura 28).

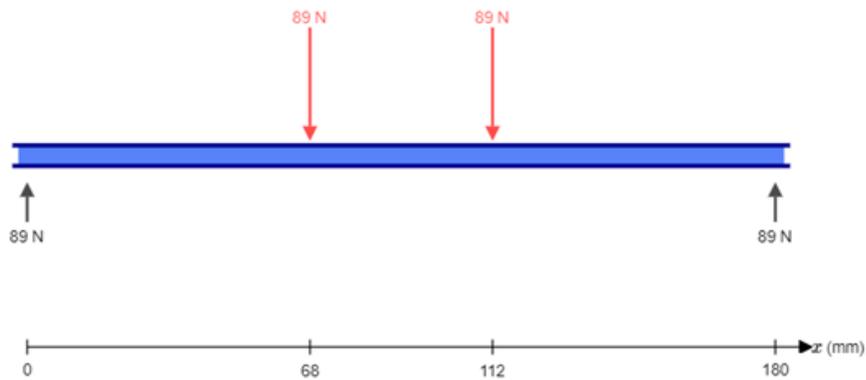


Figura 26. Diagrama de cuerpo libre.

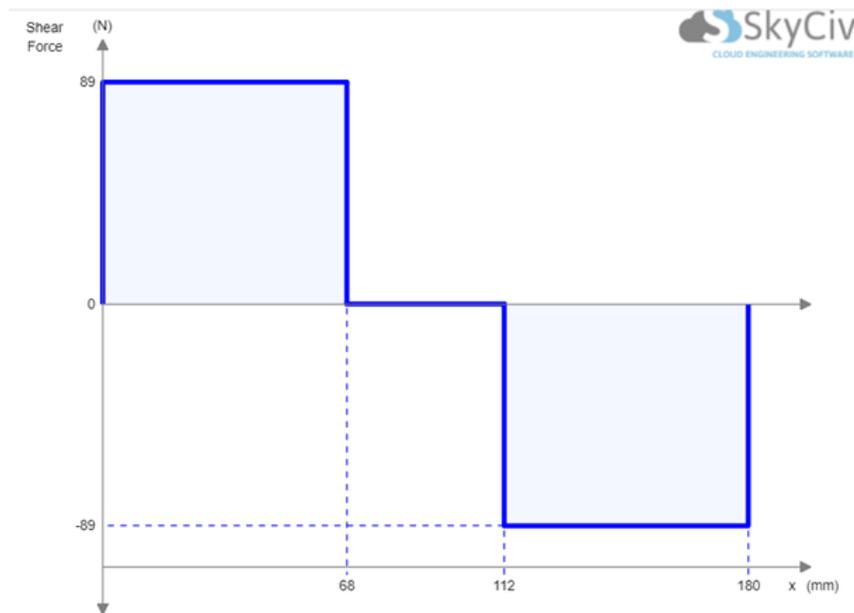


Figura 27. Diagrama de cortante.

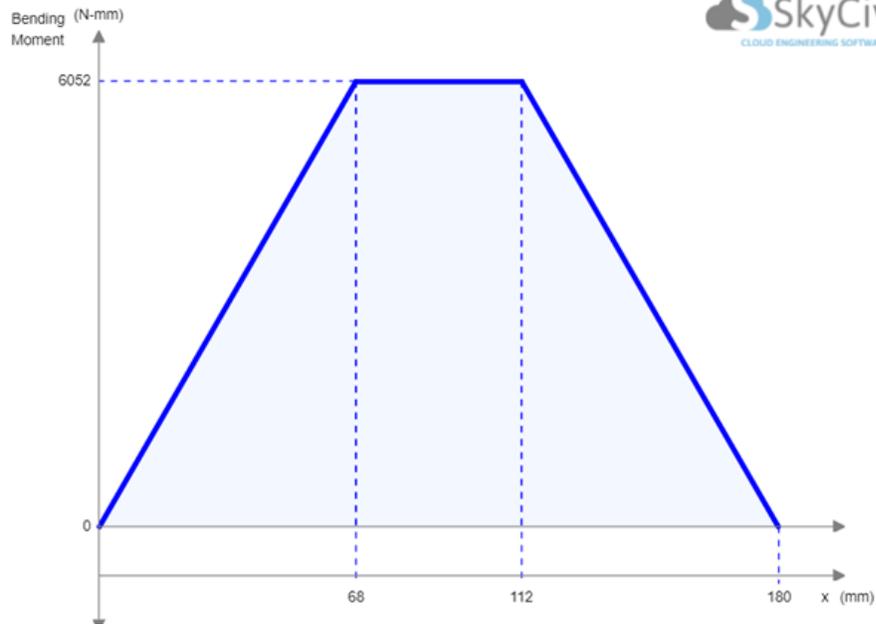


Figura 28. Diagrama de momentos.

-Considerando acero **AISI 1020 CD de 1/2 pulgada**, se calculan los esfuerzos máximos presentes, principalmente generados por un momento flexionante y cortante puro.

$$S_y = 390 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = \left[\left(\frac{32(M_m)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{F/2}{(\pi/4)d^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\sigma_{max} = \left[\left(\frac{32(6.05)}{\pi(.0127)^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{\frac{178}{2}}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(.0127)^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \mathbf{30.11 \text{ MPa}}$$

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \dots\dots\dots(7)$$

$$n_y = \frac{390}{30.11} = \mathbf{12.9}$$

Los esfuerzos presentes son pequeños, dando un factor de seguridad de 12.9, se realiza el análisis en ANSYS para comprobar el resultado y observar la deformación. En la Figura 29 se observa la zona con mayor deformación, con un valor de 0.005 mm, este valor se puede considerar como pequeño y no va a afectar el funcionamiento de la máquina.

En la Figura 30 se presenta la zona de mayor concentración de esfuerzos, siendo el valor de esfuerzo máximo igual a 32.2 MPa. Este valor no pone en riesgo la resistencia del material dado

que la resistencia a la fluencia para el acero AISI 1018 CD es de 270 MPa [37], dando como resultado un factor de seguridad de 8. Para el diseño de este elemento se considera correcto un factor de seguridad mayor a 2.

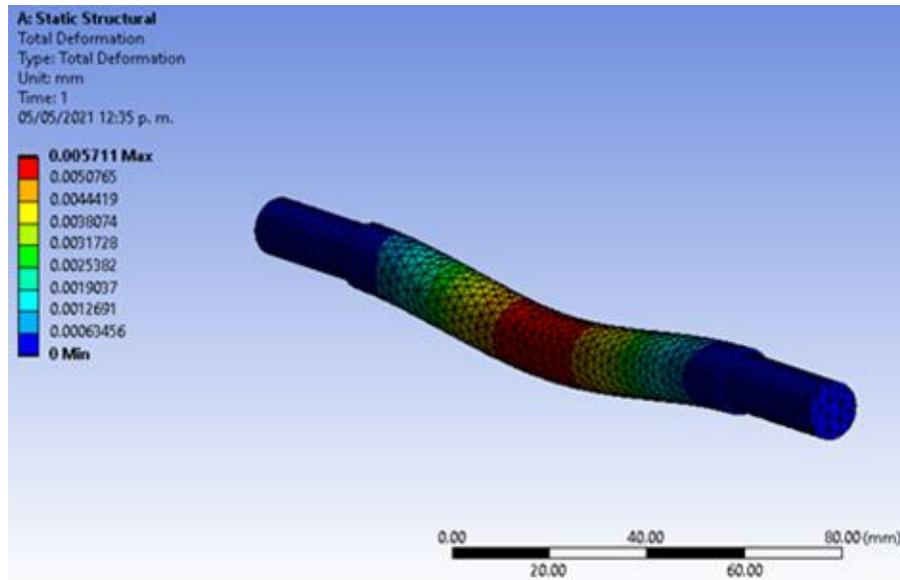


Figura 29. Deformación del perno.

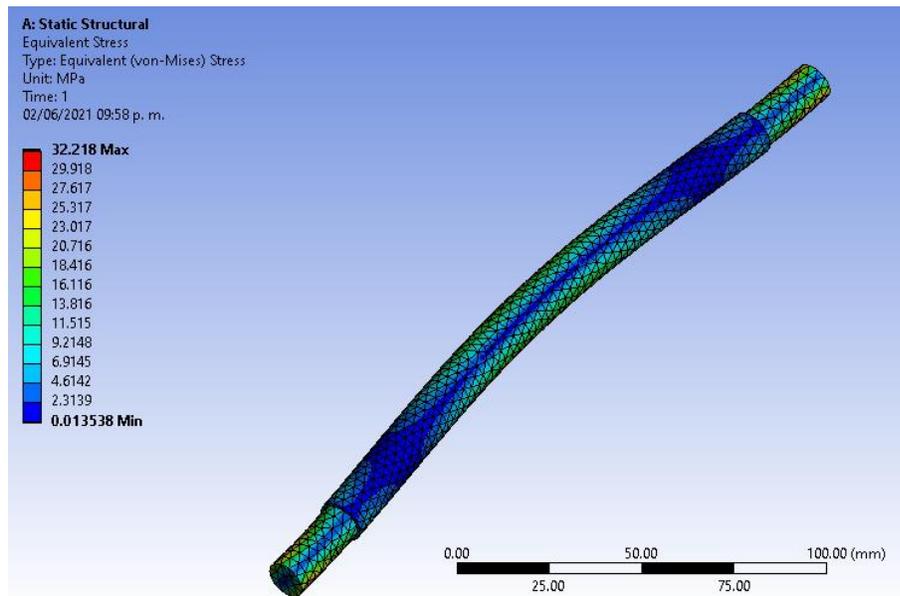


Figura 30. Esfuerzos en el perno.

Para el diseño del porta probeta se genera el arreglo mostrado en las Figuras 31 y 32, se utiliza una mordaza con una guía para mantenerla en su lugar, la mordaza presiona la probeta contra la base en sus caras laterales por medio de un par de tornillos. Para las paredes se considera placa de acero de ½ pulgada.

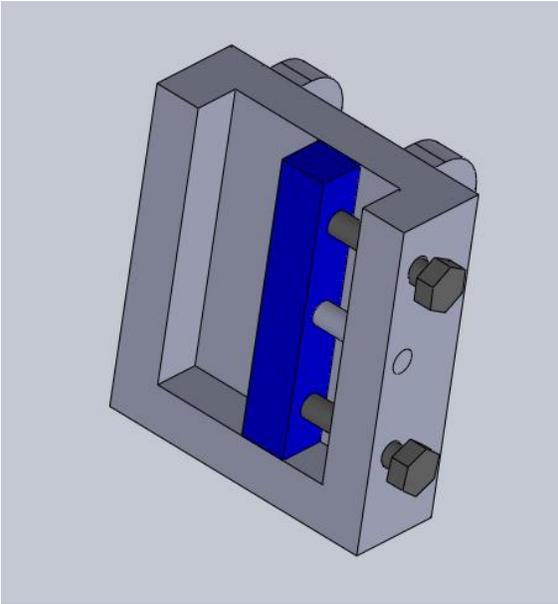


Figura 31. Porta probeta, vista 1.

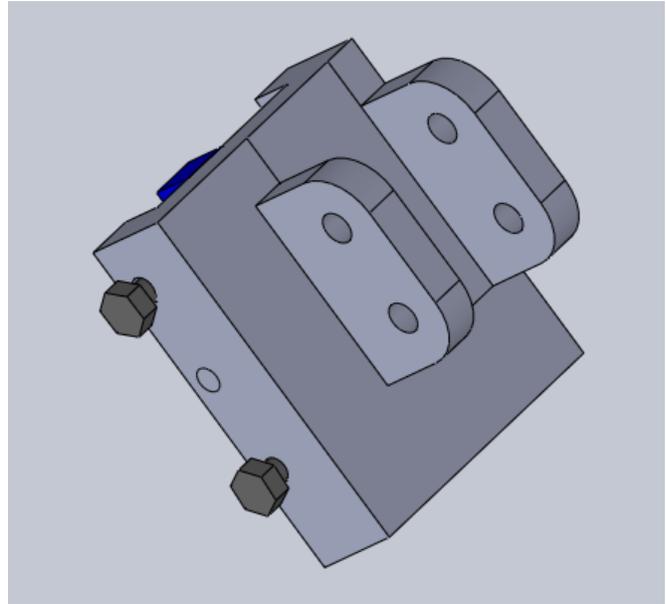


Figura 32. Porta probeta, vista 2.

Se realiza una simulación de las cargas a las cuales va a estar sometida la base, con la finalidad de conocer la deformación y esfuerzos que se muestran en las Figuras 33 y 34.

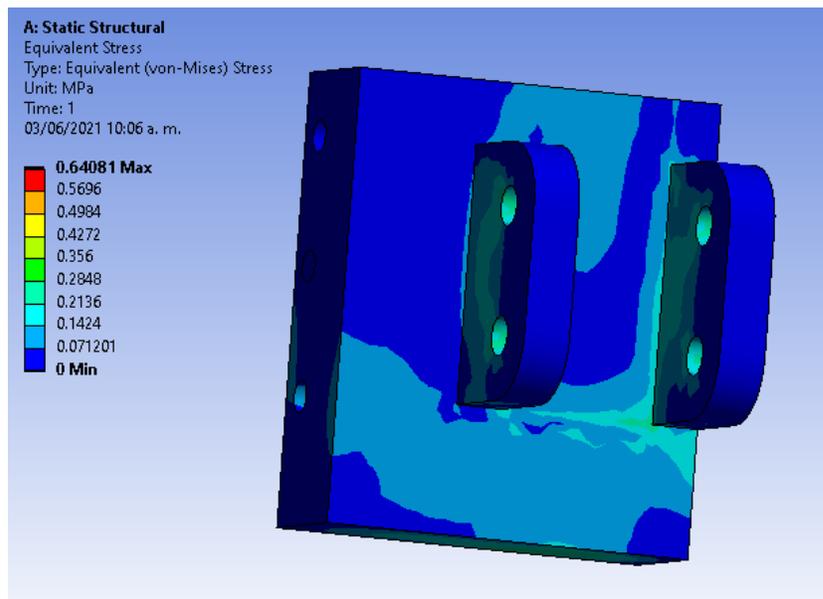


Figura 33. Esfuerzos presentes en porta probeta, vista 1.

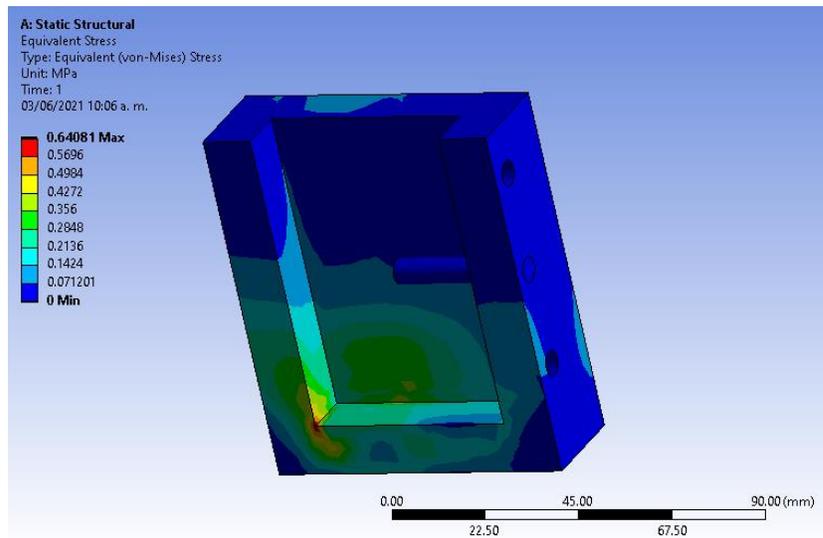


Figura 34. Esfuerzos presentes en porta probeta vista 2.

En las Figuras 35 y 36 se puede observar el arreglo general del sistema de transmisión de carga, donde se visualiza la ubicación de los elementos antes analizados.

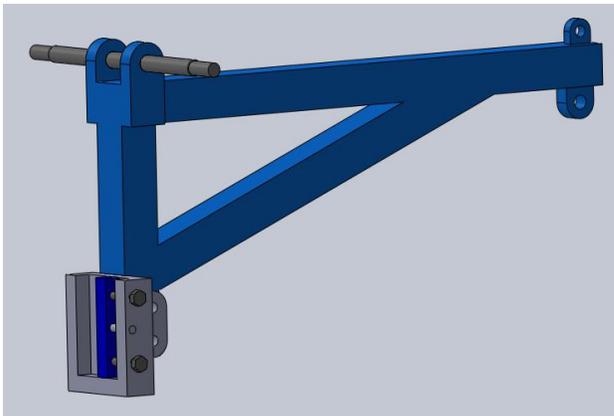


Figura 35. Sistema de transmisión de carga, vista 1.

Figura 36. Sistema de transmisión de carga, vista 2.

5.1.2 Transmisión de potencia.

El siguiente módulo a analizar es el de transmisión de potencia. Donde lo primero es la selección del motorreductor. El motorreductor seleccionado es de 1hp, con una velocidad de salida de 180 RPM, si bien la norma indica que la velocidad de salida debe de ser de 200+/- 10 RPM, comercialmente es complicado encontrar un motorreductor de estas características, por lo que se seleccionó el más cercano, que es el de 180 RPM. El número de revoluciones se encuentra en función de la distancia de abrasión generada durante el ensayo, por lo que al modificar este valor también se altera la duración de la prueba, pero sin afectar los resultados del ensayo.

Características del motorreductor:

-Motorreductor integral CA 230/460 VCA

-Marca: DODGE

-Potencia de motor 1hp a 1750 RPM

-Tamaño de reductor 38

-Relación 9.70:1

-RPM de salida: 180

-Torque de salida: 40 N-m

-Diámetro de flecha de salida: 1 in.

Es importante analizar el eje, con la finalidad de dimensionar y seleccionar el material correcto. En base a los datos del motorreductor y del análisis realizado en el módulo 1 de transmisión de carga, ya se conocen todas las cargas que estarán actuando sobre el eje (Figura 37).

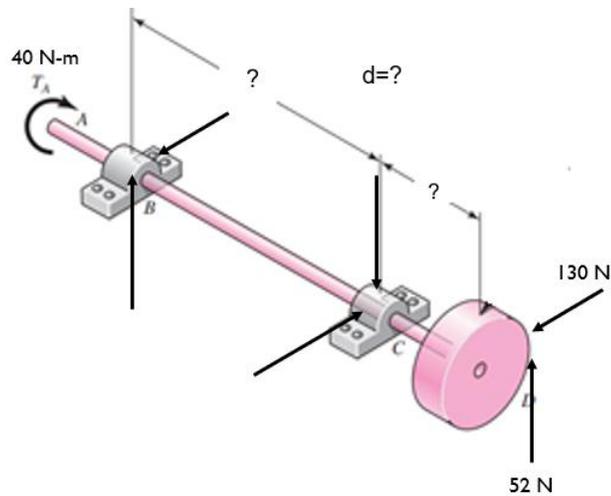


Figura 37. Fuerzas presentes en el eje.

Se propone la siguiente configuración del eje:

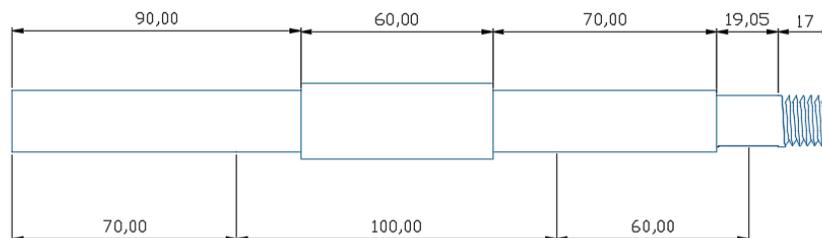


Figura 38. Propuesta del eje.

Para iniciar el análisis es fundamental conocer la fuerza cortante máxima y el momento máximo que actúa sobre el eje. De la Figura 39 a la 44, se presentan los diagramas de cortante y momentos, tanto para el plano X-Y y para el plano X-Z

Plano X-Y



Figura 39. Diagrama de cuerpo libre.

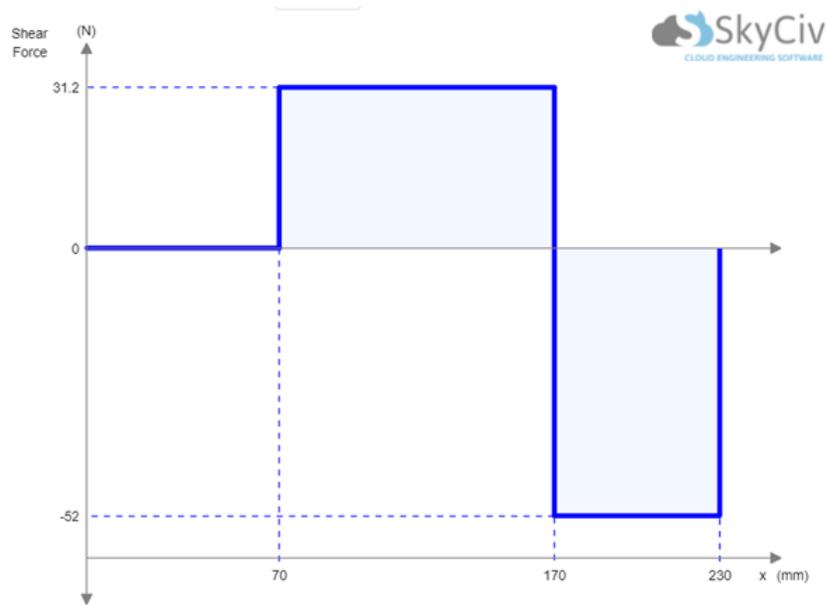


Figura 40. Diagrama de fuerzas cortantes.

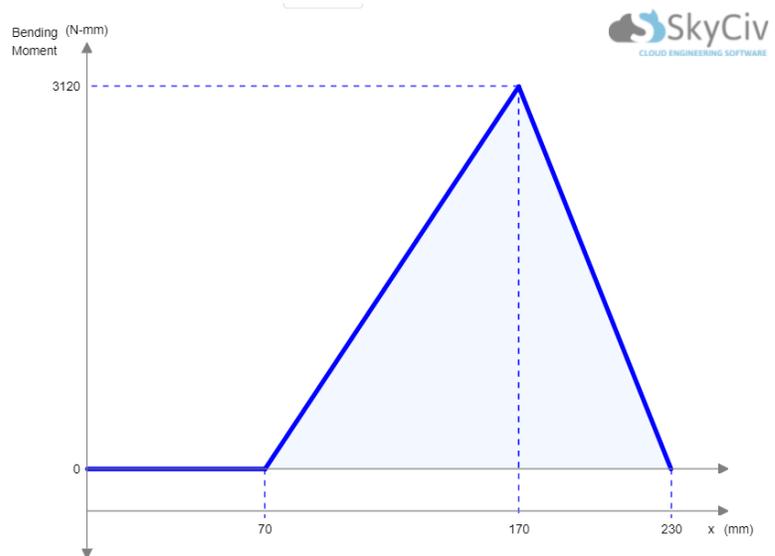


Figura 41. Diagrama de momentos.

Plano X-Z

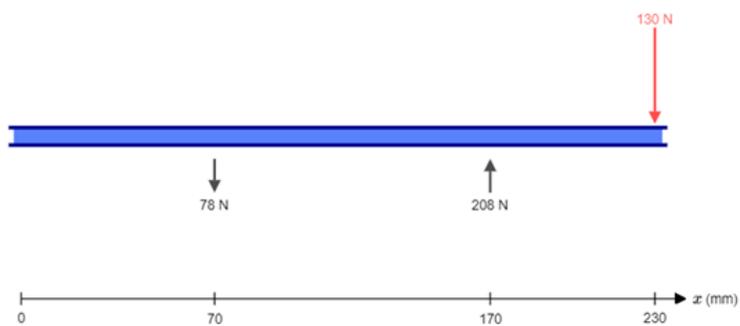


Figura 42. Diagrama de cuerpo libre.

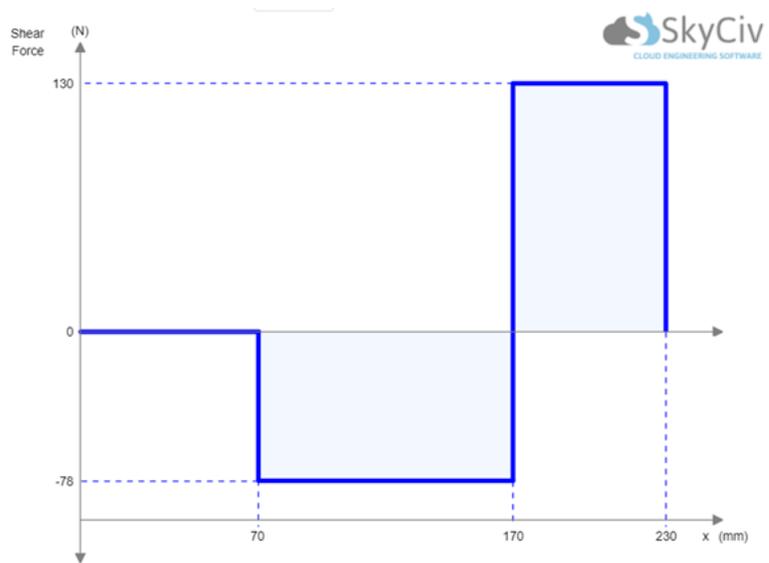


Figura 43. Diagrama de fuerzas cortantes.

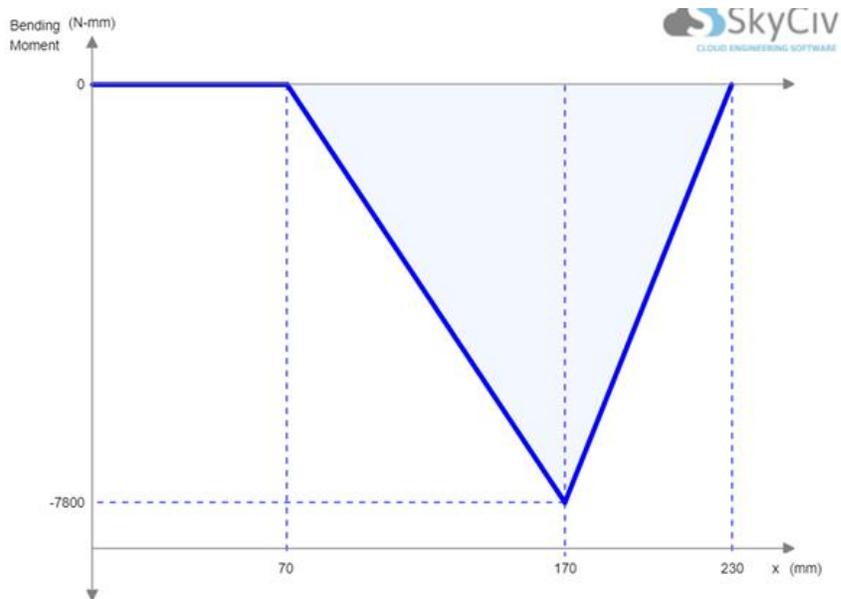


Figura 44. Diagrama de momentos.

- Se inició el análisis con el punto D ya que el momento flexionante es el más grande en ese punto, existe una concentración del esfuerzo en el hombro y existe un par de torsión presente.

$M_a = 7.8 \text{ N-m}$ $T_m = 40 \text{ N-m}$

Con ayuda de la Tabla 11 y dado que aún no conocemos los diámetros se estiman los siguientes factores para K_t y K_{ts} .

Tabla 11. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración del esfuerzo K_t y K_{ts} [37].

	Flexión	Torsión	Axial
<i>Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)</i>	2.7	2.2	3.0
<i>Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)</i>	1.7	1.5	1.9
<i>Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)</i>	2.14	3.0	---
<i>Cuñero de patín o trapezoidal</i>	1.7	---	---
<i>Ranura para anillo de retención</i>	5.0	3.0	5.0

Factores de concentración de esfuerzos

$$K_t = 2.7 \quad K_{ts} = 2.2 \quad \text{Suponiendo } K_f = K_t, \quad K_{fs} = K_{ts}$$

- Se propone un material para iniciar: **AISI 1020 CD**

$$S_{ut} = 470 \text{ MPa}$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} \dots\dots\dots(8)$$

$$S_e' = 0.5 (470) = 235 \text{ MPa}$$

-Se calculan los factores de corrección.

$$K_a = aS_{ut}^b \dots\dots\dots(9)$$

$$K_a = 4.51(470)^{-0.265} = 0.883$$

-Se supone un factor de tamaño:

$$k_b = 0.8$$

$$S_e = (K_a)(S_{ut})(k_b) \dots\dots\dots(10)$$

$$S_e = (0.883)(235)(.8) = 166 \text{ MPa}$$

-Se estima el valor del diámetro por medio del criterio de ED-Goodman que es recomendado para un diseño inicial.

-Conociendo la siguiente igualdad:

$$\tau_m = \frac{T(C)}{J} k_{fs} = \frac{16(T)}{\pi(d^3)} k_{fs} \dots\dots\dots(11)$$

$$\sigma_a = \frac{M(C)}{I} k_f = \frac{32(M)}{\pi(d^3)} k_f \dots\dots\dots(12)$$

-A partir del criterio de ED-Goodman se despeja el diámetro y se sustituyen las 2 anteriores ecuaciones, tomando en cuenta un factor de seguridad de 2.

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[\frac{2(K_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right] \right\}^{1/3} \dots\dots\dots(13)$$

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left[\frac{2(2.7*7.8)}{166 \text{ M}} + \frac{[3(2.2*40)^2]^{1/2}}{470 \text{ M}} \right] \right\}^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

$$d = 0.018 \text{ m}$$

-Se verifica y corrige el valor de k_b con el diámetro obtenido.

$$k_b = 1.24(d)^{-.107} \dots\dots\dots(15)$$

$$k_b = 0.91$$

-Y se corrige el valor de S_e

$$S_e = (0.883)(235)(.91) = 188.8 \text{ MPa}$$

-Se calcula el nuevo diámetro.

$$d = \left\{ \frac{16(2)}{\pi} \left[\frac{2(2.7 * 7.8)}{188.8 \text{ M}} + \frac{[3(2.2 * 40)^2]^{1/2}}{470 \text{ M}} \right] \right\}^{1/3}$$

$$d = \mathbf{0.0177 \text{ m}}$$

-Dado que en esta sección analizada se va a colocar una chumacera, se ajusta el diámetro a $\frac{3}{4}$ de pulgada dado que es una medida estándar para las chumaceras existentes en el mercado.

-El diámetro de la sección intermedia entre las 2 chumaceras se calcula con la siguiente relación:

$$\frac{D}{d} = 1.2 \text{ así que } D = (19.05)(1.2) = 22.86 \text{ mm}$$

-Para este diámetro se toma la dimensión de $15/16 \text{ in} = \mathbf{23.81 \text{ mm}}$

-El siguiente punto que se analiza es la zona donde se encuentra el cuñero.

Para el cuñero

-Una relación típica de diámetros es:

$$\frac{D}{d} = 1.2 \text{ así que } d = \frac{(19.05)}{1.2} = 15.875 \text{ mm}$$

Para d , se adapta el valor a **15.88 mm que es igual a 5/8 pulgadas.**

En base a la tabla 12, se obtienen las dimensiones de la cuña **w=3/16, h=3/16** y profundidad del cuñero = **3/32**.

Tabla 12. Dimensiones de cuñas cuadradas y rectangulares estándar [37].

Diámetro del eje		Tamaño de la cuña		Profundidad del cuñero
Más de	Hasta	w	h	
5/16	7/16	3/32	3/32	3/64
7/16	9/16	1/8	3/32	3/64
		1/8	1/8	1/16
9/16	7/8	3/16	1/8	1/16
		3/16	3/16	3/32
7/8	1 ¼	1/4	3/16	3/32
		1/4	1/4	1/8

-El momento en ese punto será:

$M_a = 0$ En esta zona se puede considerar como 0 $T_m = 34 \text{ N-m}$

-Considerando la siguiente relación:

$$r/d = 0.02$$

$$D/d = (5/8)/(17/32) = 1.17$$

$$r = (0.02)(15.88) = 0.3176$$

-De tablas obtenemos:

$$k_t = 2.5 \quad q = .58 \text{ (ver anexo 3, Figura 6.20 [37])}$$

$$k_{ts} = 1.7 \quad q = .62 \text{ (ver anexo 3, Figura 6.21 [37])}$$

$$K_f = 1 + q(kt - 1) \dots\dots\dots(16)$$

$$K_{fs} = 1 + q(kts - 1) \dots\dots\dots(17)$$

$$K_f = 1 + 0.58(2.5 - 1) = 1.87$$

$$K_{fs} = 1 + .62(1.7 - 1) = 1.434$$

$$\sigma_m' = \left[3 \left(\frac{16 Kfs Tm}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(18)$$

$$\sigma_m' = \left[3 \left(\frac{16 (1.434)(34)}{\pi (0.01588)^3} \right)^2 \right]^{1/2} = \mathbf{108 MPa}$$

-Se verifica el factor de seguridad:

$$\frac{1}{nf} = \frac{\sigma_a'}{Se} + \frac{\sigma_m'}{Sut} \dots\dots\dots(19)$$

$$\frac{1}{nf} = \frac{108}{470}; \quad nf = \mathbf{4.3}$$

A partir del análisis se obtienen los diámetros finales del eje (Figura 45) y se indica una **cuerda de 5/8 x 11 hilos por pulgada**.

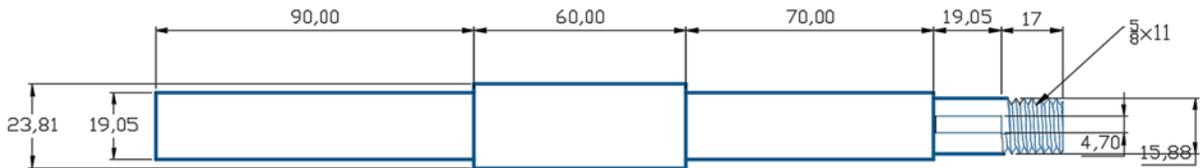


Figura 45. Dimensiones finales del eje.

A partir de la ecuación 20 [37] se calcula el esfuerzo máximo de Von Mises con la finalidad de verificar contra la fluencia, como ya se conocen los diámetros del eje también se puede recalculer Kf y Kfs.

$$r/d=0.02$$

$$r=(3/4)(.02)=0.3801$$

$$D/d= (15/16)/(3/4) = 1.25$$

-De tablas obtenemos:

$$kt =2.5 \quad q= 0.6 \text{ (ver anexo 3, Figura 6.20 [37])}$$

$$kts =2.2 \quad q= 0.65 \text{ (ver anexo 3, Figura 6.21 [37])}$$

$$Kf=1+0.6(2.5-1)=1.9$$

$$Kfs=1+.65(2.2-1)=1.78$$

$$\sigma_{max} = \left[\left(\frac{32k_f(M_m+M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16k_{fs}(T_m+T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(20)$$

$$\sigma_{max} = \left[\left(\frac{32(1.9)(7.8)}{\pi(0.01905)^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16(1.78)(40)}{\pi(0.01905)^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \mathbf{93.43 \text{ MPa}}$$

AISI 1020 CD $S_y = 390 \text{ MPa}$

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

$$n_y = \frac{390}{93.43} = \mathbf{4.17}$$

Para verificar este valor, se realiza una simulación en ANSYS (Figuras 46 y 47) para encontrar el mayor esfuerzo presente y la deformación.

Esfuerzo= 74 MPa

Deformación= 0.25 mm

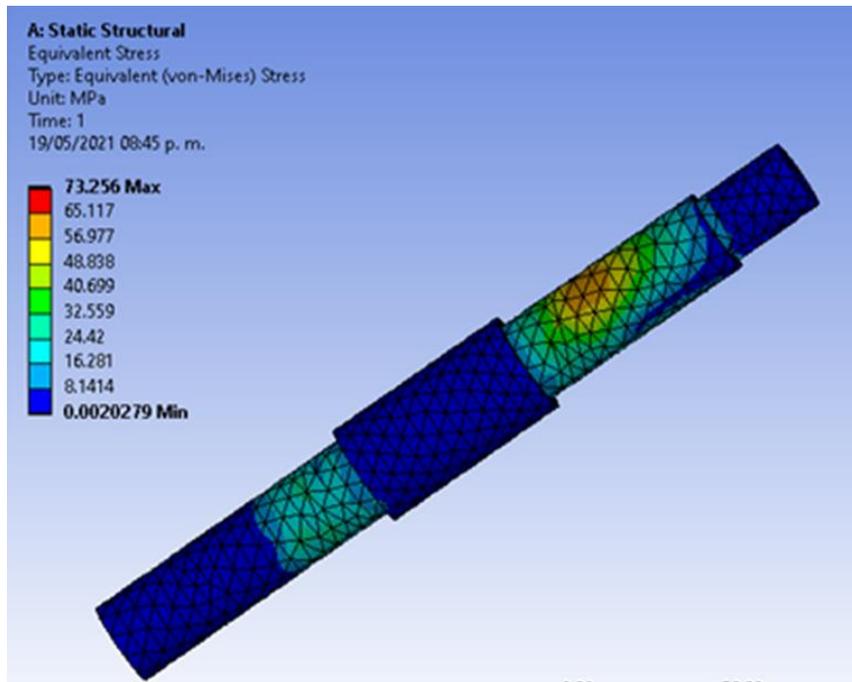


Figura 46. Esfuerzo presente en el eje.

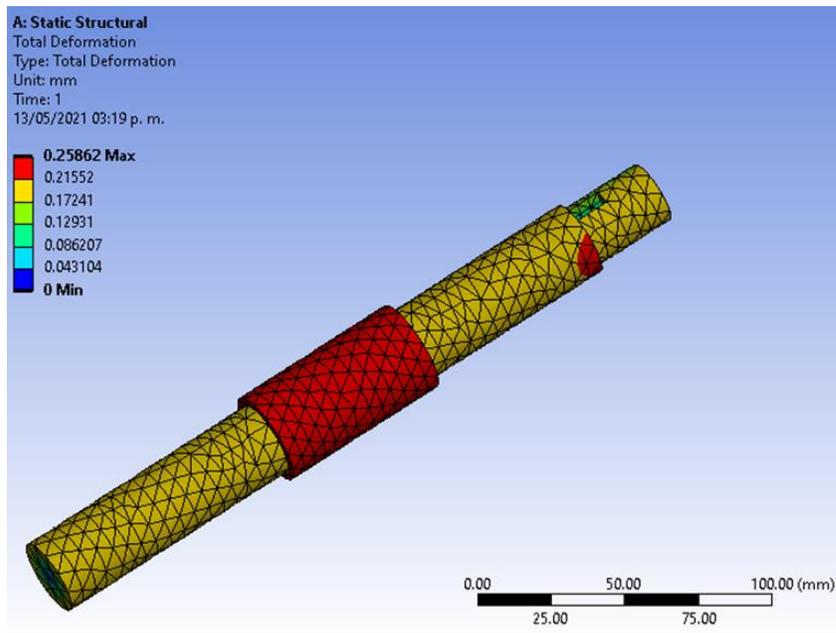


Figura 47. Deformación en el eje.

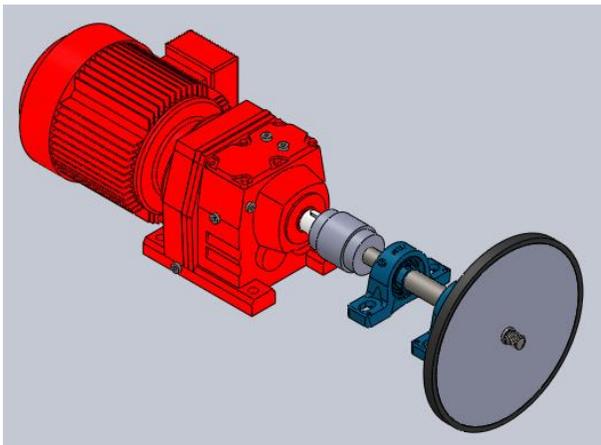


Figura 48. Transmisión, vista 1.

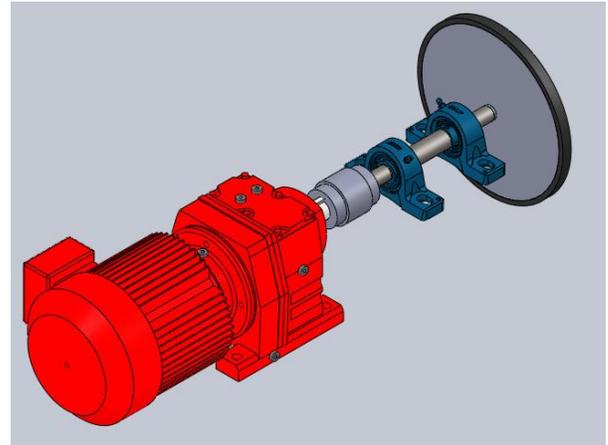


Figura 49. Transmisión, vista 2.

En las Figuras 48 y 49 se muestra el arreglo final del módulo de transmisión de potencia, donde las dimensiones del motorreductor, acople flexible y chumaceras, están dadas por el fabricante, y las dimensiones de la rueda de caucho se especifican en la norma ASTM G-65.

5.1.3 Estructura

Se realiza un análisis de la estructura, las cargas que se toman en cuenta son: las reacciones en el perno que soporta la palanca de transmisión de carga, las reacciones en las chumaceras del eje, y de igual manera se considera el peso del motorreductor. Para el material de la estructura se consideran las propiedades del aluminio y la geometría es la presentada en el diseño conceptual.

En la Figura 50 se observa que el valor de la deformación máxima es de 0.1196 mm, este es un valor aceptable si se compara con el tamaño de la estructura. Para la geometría y dimensiones propuestas el esfuerzo a la fluencia no se ve excedido, dado que para el aluminio 6063 T5 el valor máximo que soporta es de 260 MPa [38] y como se muestra en la Figura 51 el valor más grande que alcanza es de 9.22 MPa.

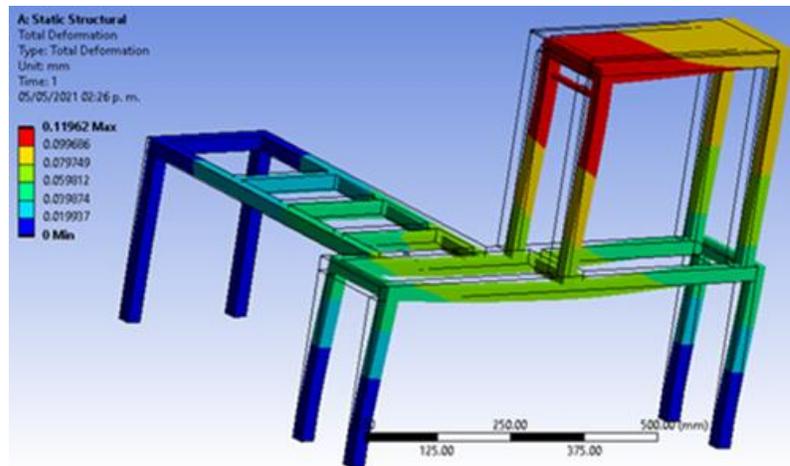


Figura 50. Deformación en la estructura.

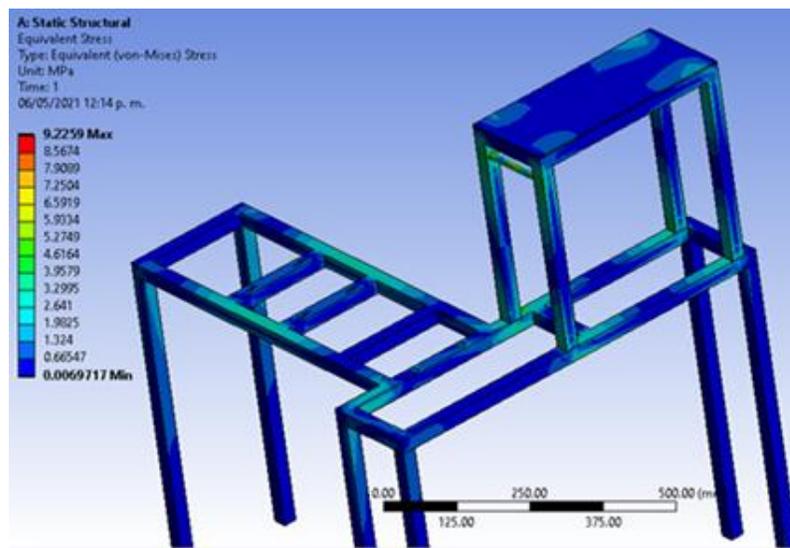


Figura 51. Esfuerzo en la estructura.

Dado que ya se tiene el diseño de los módulos 1 y 2, se puede iniciar a dimensionar la estructura final, se comienza con una primera parte, la cual sostendrá el módulo de transmisión de potencia y la parte 2 de la estructura que a su vez soportará el módulo de transmisión de carga.

Se requieren las dimensiones como distancia entre chumaceras, distancia entre barrenos de la base del motorreductor y separación entre cada elemento, para obtenerlas se utiliza el mismo software de Solid Works, como se muestra en la Figura 52.

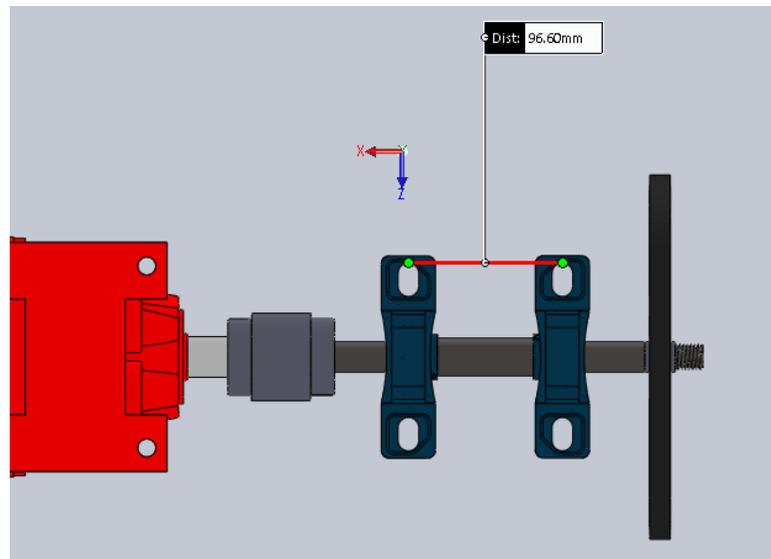


Figura 52. Medición de la transmisión.

Para la construcción de la estructura será utilizado un perfil estructural 40x40 mm de aluminio 6063 T5, en la Figura 53 se muestra la configuración necesaria para colocar todos los elementos del sistema. Ver sección 4, Planos, para conocer las dimensiones.

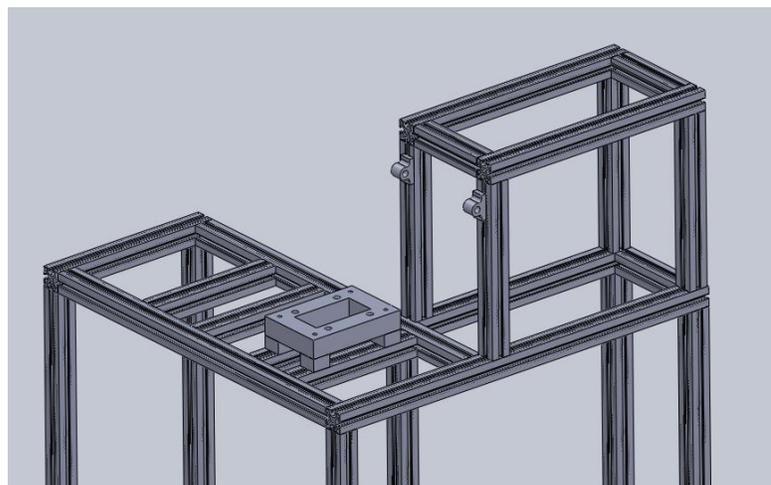


Figura 53. Estructura.

5.1.4 Ensamble preliminar del diseño a detalle

En las Figuras 54 y 55 se observa una vista general de la máquina de abrasión con todos los elementos que la componen, en estas vistas no se muestran las guardas de seguridad.

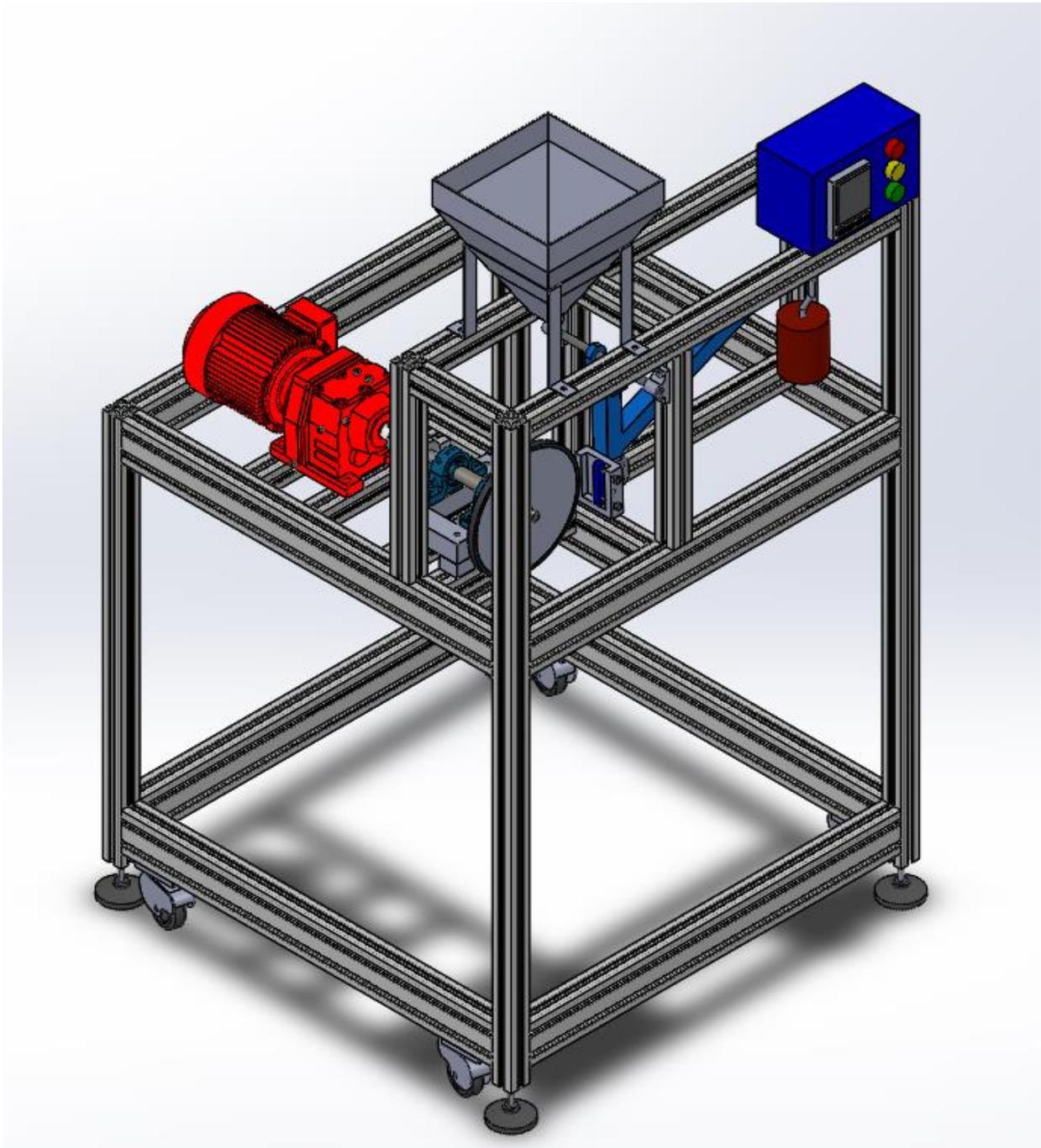


Figura 54. Ensamble, vista 1.

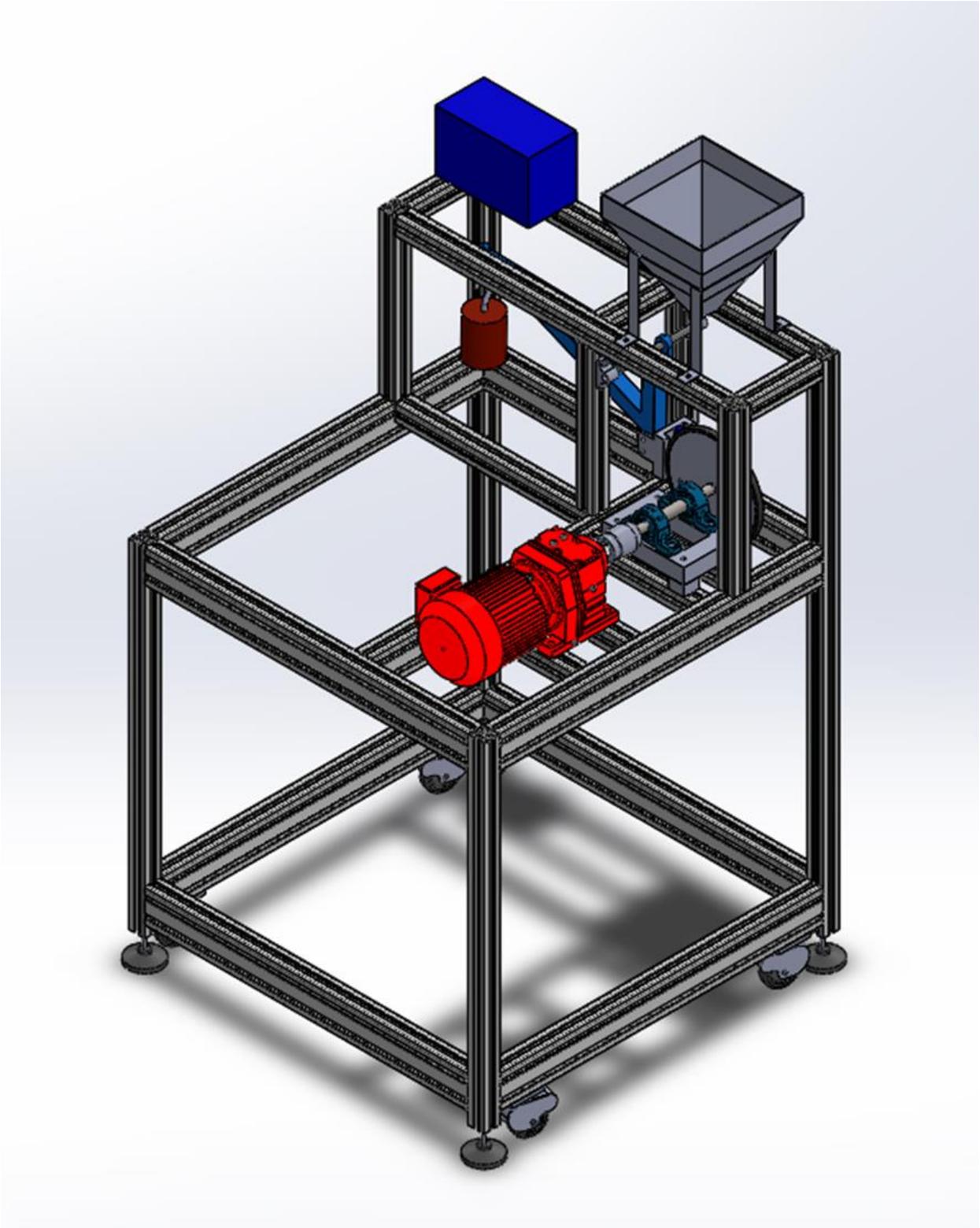


Figura 55. Ensemble, vista 2.

5.2 Construcción de la máquina

5.2.1 Estructura

El módulo de estructura se compone como tal del armado de la base con aluminio estructural y los elementos de sujeción necesarios, así como las guardas de seguridad con sus respectivos accesorios, como bisagras y manijas.

5.2.1.1 Estructura de aluminio

El material de construcción de la estructura es aluminio estructural modelo 10040 de dimensiones 40x40mm (Figura 56) y el modelo 10080 de 40x80 mm (Figura 57), según las características que proporciona el proveedor MOAS®, el material es una aleación de aluminio 6063 con temple T5, acabado anodizado natural mate, con una resistencia a la tensión mínima de 260 N/mm², con un porcentaje de elongación de -8% y Módulo de elasticidad de 70,000 N/mm² [38].

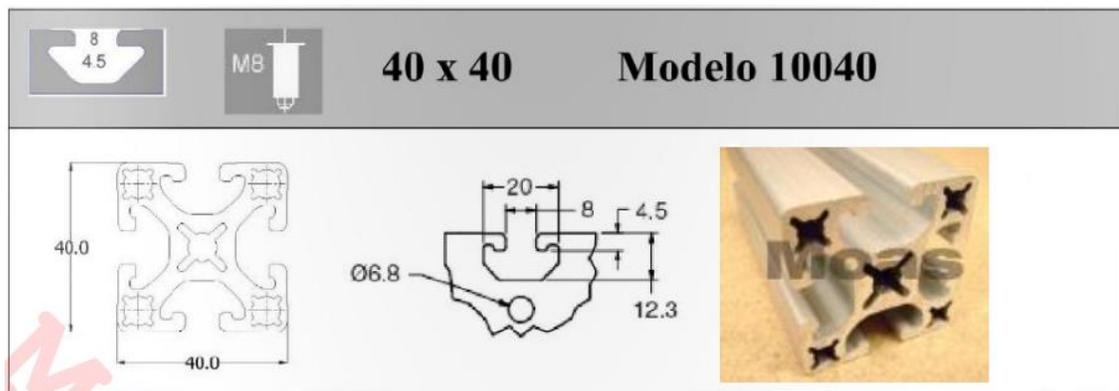


Figura 56. Perfil 40x40mm [38].

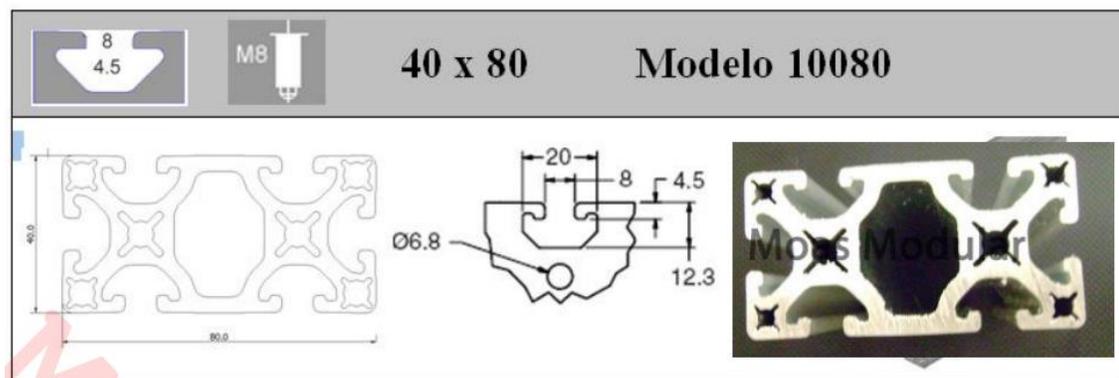


Figura 57. Perfil 40x80mm [38].

Se inicia la construcción de la estructura cortando los elementos como se muestra en la Figura 58, según la cantidad y dimensión especificada en plano 1 y 2 (anexo 1) para su posterior ensamblaje

usando sujetadores estándar 40 modelo 20-002 del mismo proveedor MOAS®, en la Figura 59 se muestra a detalle la unión. En la Figura 60 se muestra la estructura principal armada.



Figura 58. Elementos de la estructura.

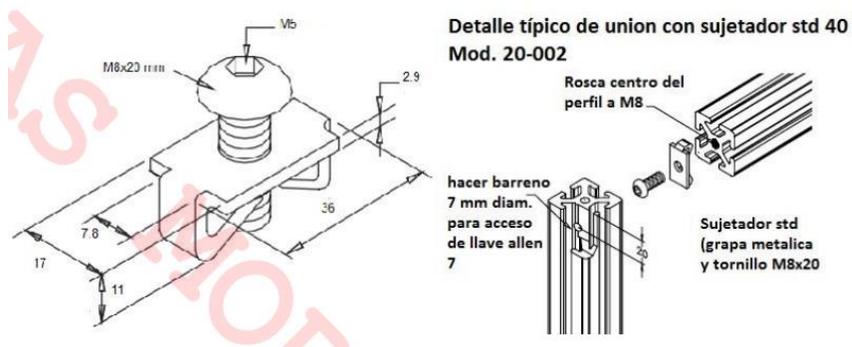


Figura 59. Detalle de unión de 2 perfiles con sujetadores [38].



Figura 60. Ensamble de la estructura

5.2.1.2 Guardas de seguridad

Parte importante en la construcción de la máquina son las guardas de seguridad, tanto para prevenir daños al operador, así como daños a la propia máquina. Es importante considerar puertas de acceso que nos permitan cambiar la probeta, los contrapesos y realizar su limpieza, para esto se diseñan e imprimen en 3D las bisagras (Figura 61) que nos permitirán colocar las puertas de acrílico como se muestra en la Figura 62.



Figura 61. Bisagras.

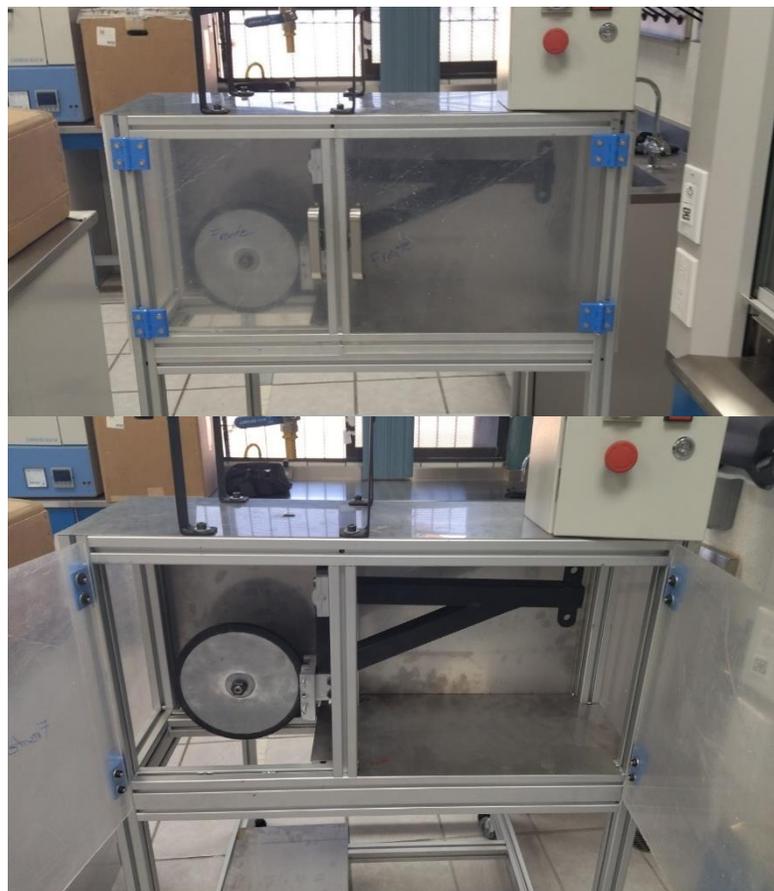


Figura 62. Puertas de acrílico, cerradas.

En la parte superior, inferior y trasera se colocan una serie de guardas de acero inoxidable de manera fija, mientras que en los costados se colocan de acrílico para permitir la visibilidad, tal cual se puede observar en la Figura 63.

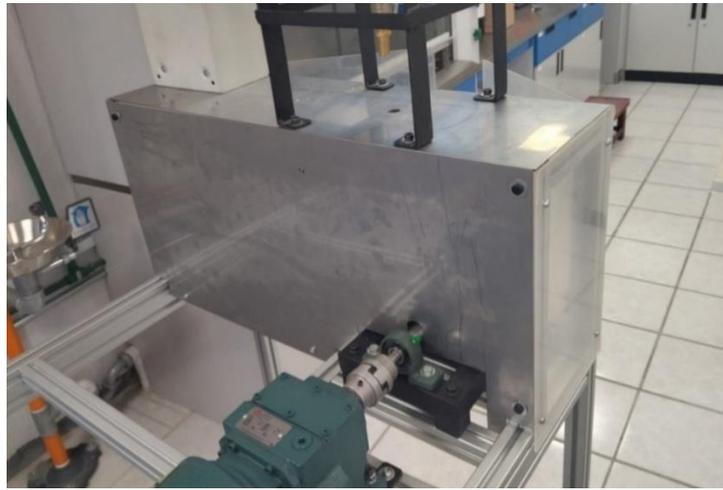


Figura 63. Guardas.

5.2.2 Transmisión de carga

En el módulo de transmisión de carga se presenta la construcción de los diferentes elementos como son la palanca, el portaprobeta, el eje, buje y abrazaderas de sujeción para la palanca.

5.2.2.1 Brazo de palanca

Se construye el brazo de palanca según las dimensiones indicadas por el plano 3 (anexo 1) y el resultado se muestra en la Figura 64 el material utilizado para su construcción es acero estructural A36, grado B (PTR) el cual tiene una resistencia a la fluencia de 250 MPa [36]. La unión se realizó por medio de soldadura eléctrica.



Figura 64. Brazo de palanca.

5.2.2.2 Portaprobeta

El portaprobeta se compone de 5 elementos, la caja, mordaza, dos tornillos de ajuste y un eje guía. El detalle de las piezas se puede observar en el plano 4 y 5 del anexo 1. La caja y la mordaza fueron maquinados en acero AISI 1020, en la Figura 65 se muestra el ensamble final el cual es capaz de sostener una probeta de 1" x 3" x 1/2".

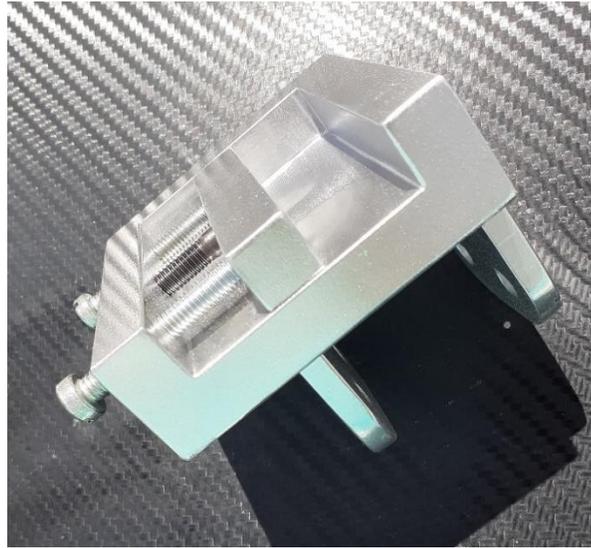


Figura 65. Portaprobeta.

5.2.2.3 Eje, buje y abrazaderas de sujeción

En la Figura 66 se muestra el eje que servirá de apoyo a la palanca, junto con el par de abrazaderas para fijarlo a la estructura, las abrazaderas se componen de 2 elementos, la base y la tapa, todos estos elementos también están contruidos en acero AISI 1020 por medio del proceso de torneado y fresado. Las dimensiones y materiales de estos elementos se detallan en los planos 6,7 y 8 del anexo 1.

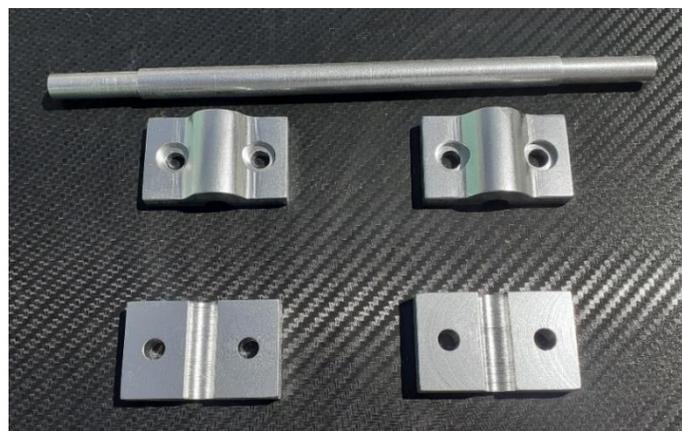


Figura 66. Eje y abrazaderas.

Otro elemento importante es el buje que se muestra en la Figura 67, este permite mantener en su lugar el brazo de palanca y así mismo ajustar la distancia a lo largo del eje de la Figura 66, cuenta con dos prisioneros que son los que permiten liberar o bloquear el movimiento.



Figura 67. Buje de ajuste.

Por último, en la Figura 68 se muestra el ensamble general del sistema de transmisión de carga, en un extremo se pueden observar un par de “orejas” que serán las que permitirán colocar los pesos necesarios para ejercer la fuerza indicada por la norma y también para sostener la palanca en una posición que permita colocar la probeta.



Figura 68. Sistema de transmisión de carga.

5.2.3 Transmisión de potencia

En este apartado se presenta la construcción de los diferentes elementos que comprenden el módulo de transmisión de potencia, como son, el disco de acero con su vulcanizado de caucho, el eje de transmisión, la base para las chumaceras que van a soportar al eje y el máquina del acople entre el motor y el eje.

5.2.3.1 Disco de abrasión

Uno de los principales elementos que constituyen la máquina es el disco de abrasión, en la Figura 69 se muestra el disco ya maquinado en acero AISI 1020, con las dimensiones especificadas en la norma que de igual manera se muestran en el plano 9 (Anexo 1). En la Figura 70 se puede ver el disco con el vulcanizado en su perímetro, la norma ASTM G65 indica que el material de vulcanizado debe ser clorobutilo con una dureza shore A-60 [±] 2, pero surge el problema de no encontrar un proveedor que trabaje este tipo de material, por lo que se optó por usar acrilonitrilo butadieno, el cual tiene propiedades similares a las del clorobutilo (como se observa en la Tabla 13) y en cuestión de la dureza no hay problema, dado que una vez ya curado, se obtiene una medición de A-59.

Tabla 13. Comparativa de propiedades de los cauchos.

	Densidad g/cm ³	Resistencia a la tracción MPa	Elongación max. %	Modulo elástico MPa	Temperatura mínima de servicio en °C	Temperatura máxima de servicio en °C	Resistencia a la abrasión	Resistencia al desgarramiento
Clorobutilo	.94	12-21	450-500	2.1-10,3	-60	120	Excelente	Excelente
Acrilonitrilo butadieno	.95	7-24	400-600	3,4-9,3	-60	120	Excelente	Buena



Figura 69. Disco de acero.



Figura 70. Disco con vulcanizado.

5.2.3.2 Eje de transmisión

Una vez calculado el eje de transmisión, en el plano 10 del anexo 1 se indica la geometría y dimensiones finales. En la Figura 71 se muestra el maquinado por medio del proceso de torneado, el material utilizado es acero AISI 1020, en la Figura 72 se observa el eje ya terminado con un par de cuñeros para fijar el disco y el acople flexible y también una sección con cuerda en el extremo, esto para evitar que salga de su lugar el disco.

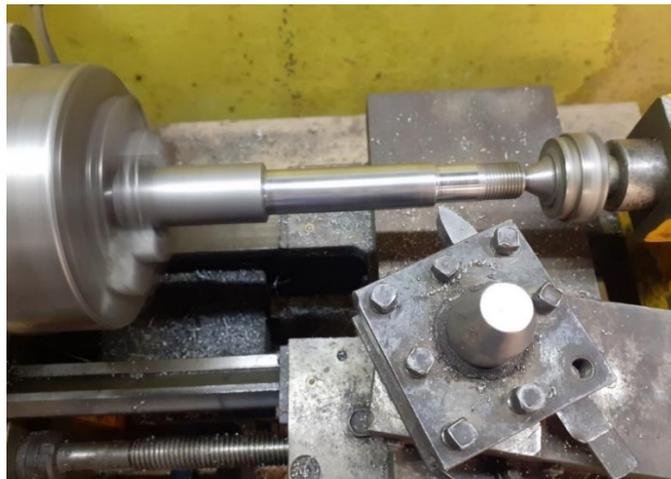


Figura 71. Maquinado de eje.



Figura 72. Eje de transmisión.

5.2.3.3 Base para chumaceras

El eje de transmisión estará soportado por un par de chumaceras de piso de $\frac{3}{4}$ por lo que se construye una base en acero estructural A-36 grado B, las dimensiones y geometría se muestran en el plano 11 (anexo 1) mientras que la pieza terminada se muestra en la Figura 73 y en la Figura 74 se observa el arreglo del eje de transmisión junto con las chumaceras.

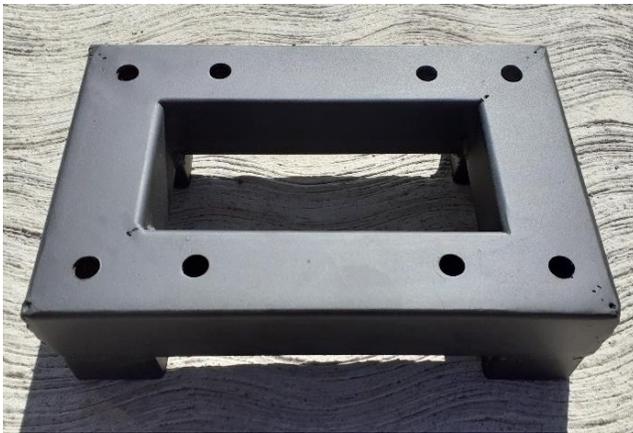


Figura 73. Base de chumaceras.

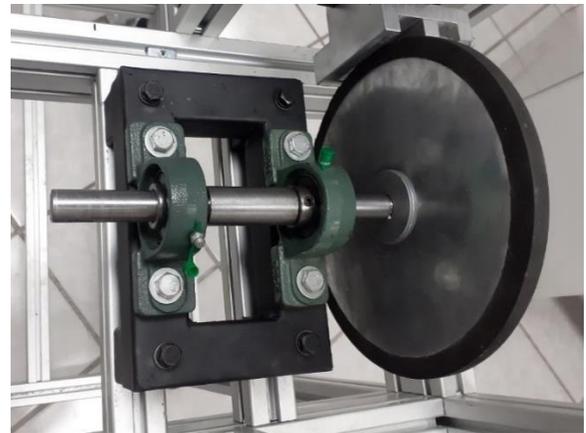


Figura 74. Arreglo del disco de abrasión.

5.2.3.4 Motorreductor

Otro elemento importante de la máquina es el motorreductor, será utilizado el de la Figura 75 y sus características se presentan a continuación.

Características del motorreductor:

- Motorreductor integral CA 230/460 VCA
- Marca: DODGE
- Potencia de motor 1hp a 1750 RPM
- Tamaño de reductor 38

- Relación 9.70:1
- RPM de salida: 180
- Torque de salida: 40 N-m
- Diámetro de flecha de salida: 1 pulgada



Figura 75. Motorreductor.

5.2.3.5 Acople

Con la finalidad de acoplar el eje del motor con el eje de transmisión será usado un acople tipo estrella, este acople cuenta con una junta de elastómero que permite compensar pequeñas desalineaciones de los ejes y absorben vibraciones y golpeteo, en la Figura 76 se observa el acople con el maquinado correspondiente al diámetro de los ejes, con su respectivo cuñero y prisionero.



Figura 76. Acople vista 1.

En la Figura 77 se puede apreciar el arreglo del sistema de transmisión de potencia ya colocado sobre la estructura.



Figura 77. Sistema de transmisión de potencia.

5.2.4 Tolvas

En esta sección se presenta la construcción de la tolva superior junto con su base, también se presenta la llave de paso, que va a permitir el flujo de abrasivo hacia la boquilla que se sujeta con una base que igual se muestra.

5.2.4.1 Tolva superior

A partir de una sola pieza de lámina de acero inoxidable y con ayuda de una dobladora se genera la tolva superior (Figura 78) con las dimensiones necesarias para contener el abrasivo necesario para realizar una prueba de abrasión, puede contener hasta 8 kg de abrasivo, la unión de los extremos se realiza por medio del proceso de soldadura tipo TIG como se observa en la Figura 79.

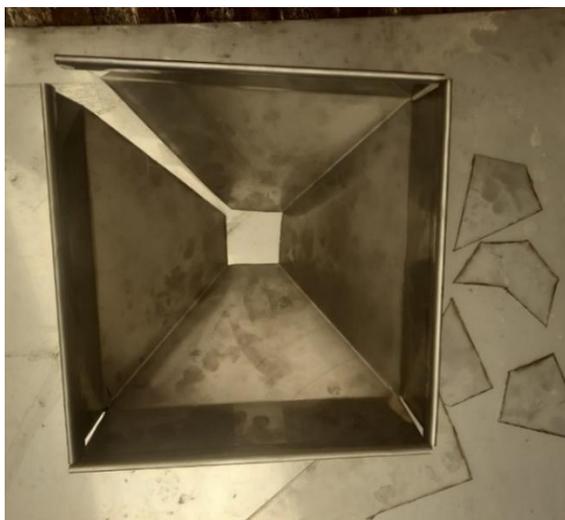


Figura 78. Doblado de tolva.



Figura 79. Tolva soldada.

5.2.4.2 Base y llave de apertura y cierre

Es necesario realizar una base como la que se muestra en la figura 80, esto para colocar la tolva sobre la estructura (arreglo mostrado en la Figura 81) y también tener fácil acceso a la llave de paso para iniciar y detener el flujo de abrasivo, la llave de paso es de tipo bola de ½ pulgada, como se observa en la Figura 82 el diseño de la base permite colocar y retirar fácilmente la tolva para su limpieza y mantenimiento.



Figura 80. Base de tolva.



Figura 81. Arreglo de base y tolva.



Figura 82. Llave de paso.

5.2.4.3 Boquilla y base de boquilla.

Basado en la geometría que recomienda la norma ASTM-G65 se construye la boquilla para el abrasivo como se muestra en la Figura 83, esta se compone de tres piezas, la base y dos tapas, las tres maquinadas en cobre y soldadas con estaño, se ajustó la abertura de la salida para obtener un flujo de 200 g/min.



Figura 83. Boquilla.



Figura 84. Base de boquilla.

5.2.5 Control

Para la parte del arranque y paro del motor, es necesario contar con un sistema que permita programar el lapso de tiempo que estará en funcionamiento, y que al terminar detenga el motor en automático. El gabinete que cuenta con un Timer y un botón de arranque y para y un paro de emergencia se muestra en la Figura 85.

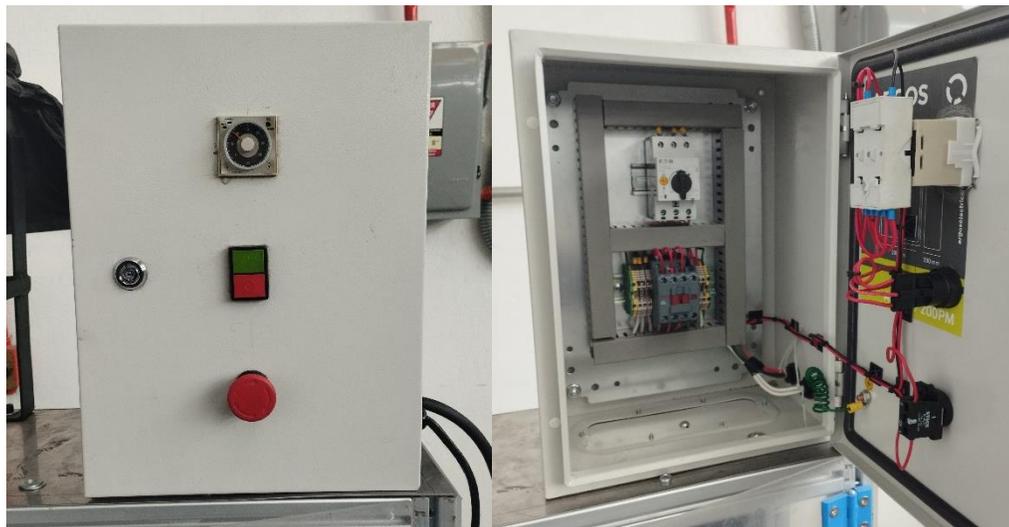


Figura 85. Gabinete de control.

5.2.6 Ensamble general

En la Figura 86 se puede observar el ensamble final de la máquina donde se aprecian todos los elementos descritos en este capítulo.



Figura 86. Ensamble general de la máquina.

5.3 Análisis de contacto

Cuando dos cuerpos con superficies curvas se presionan entre sí, el contacto puntual o lineal cambia a un área de contacto y los esfuerzos que se desarrollan en los dos cuerpos son tridimensionales. Los problemas del esfuerzo de contacto se originan en el contacto de una rueda y un riel, en el árbol de levas y los balancines, en los dientes de engranes acoplados y en la acción de los cojinetes de bolas. Las fallas usuales se ven como grietas, picaduras o escamado en la superficie del material [37].

El caso más general del esfuerzo de contacto ocurre cuando cada cuerpo en contacto tiene un radio de curvatura doble; es decir, cuando el radio del plano de rodamiento es diferente del radio de un plano perpendicular y ambos planos pasan por el eje de la fuerza de contacto. Aquí sólo se consideran los dos casos especiales de esferas y cilindros en contacto [37].

Los resultados que se presentan fueron obtenidos por Hertz y, por lo tanto, con frecuencia se les conoce como esfuerzos hertzianos.

5.3.1 Introducción al análisis y propiedades de materiales.

Como se mencionó antes, el análisis se centra en el contacto “cilindro-plano” existente en una máquina de abrasión bajo la norma ASTM-G65, este contacto se da entre la rueda de caucho que genera la abrasión y la probeta a estudiar. La probeta puede ser de diferentes materiales, ya sean metales, aleaciones o recubrimientos.

A continuación, se presenta el análisis de esfuerzos generados por el contacto para 2 casos diferentes, el primer caso es considerando que la probeta es de acero estructural y el segundo caso es para una probeta de aluminio, en la Tabla 14 se pueden observar las propiedades generales de estos materiales, que servirán tanto para el análisis analítico, como para el numérico.

Tabla 14. Propiedades de los materiales [39].

	Caucho	Acero	Aluminio
Módulo de elasticidad	.8 MPa	206 GPa	70 GPa
Módulo de poisson	.48	.29	.33
Densidad	957 kg/m ³	7850 kg/m ³	2700 kg/m ³

5.3.1.1 Análisis de contacto Caucho-Acero

-Dimensiones

$$r_1 = 0.1143 \text{ m}$$

$$r_2 = \infty$$

$$L = 0.0127 \text{ m}$$

-Módulo equivalente

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \dots\dots\dots \text{Ec. 21}$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} = \frac{1-.48^2}{.0008} + \frac{1-.29^2}{206} = 9.62 \times 10^{-7}$$

$$E^* = 1039496.235 \text{ Pa}$$

-Radio equivalente

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{\infty} \dots\dots\dots \text{Ec. 22}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{.1143} + \frac{1}{\infty}$$

$$R = 0.1143 \text{ m}$$

-Semi-ancho de contacto

$$b = \sqrt{\frac{2PR}{\pi LE^*}} \dots\dots\dots \text{Ec. 23}$$

$$b = \sqrt{\frac{2PR}{\pi LE^*}} = \sqrt{\frac{2(150)(.1143)}{\pi(.0127)(1039496.235)}} = 0.028754 \text{ m}$$

-Área de contacto

$$A = 2b * L \dots\dots\dots \text{Ec. 24}$$

$$A = 2b * L = 2(.028754 \text{ m})(.0127 \text{ m}) = 7.3035 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

-Presión máxima de contacto

$$P_{max} = \frac{2P}{\pi bL} \dots\dots\dots \text{Ec. 25}$$

$$P_{max} = \frac{2P}{\pi bL} = \frac{2(150)}{\pi(.028754)(.0127)} = 0.2615 \text{ MPa}$$

-También se hace uso de una calculadora de esfuerzos Hertzianos en línea [40].

En la Figura 87 se presenta la pantalla que permite introducir los datos de entrada, al considerar el contacto cilindro-plano en automático se elimina el dato del diámetro 2.

En la Figura 88 se muestran los resultados, donde obtenemos en primer lugar la presión máxima, seguido el máximo esfuerzo cortante para ambos cuerpos, así como la profundidad a la que se da este máximo esfuerzo y por último el ancho del contacto.

INPUT PARAMETERS			
Parameter	Object-1	Object-2	Unit
Object shape	Cylinder	Plane	
Poisson's ratio [ν_1, ν_2]	0.48	0.29	
Elastic modulus [E_1, E_2]	.0008	206	GPa
Diameter of object [d_1, d_2]	.1143		m
Force [F]		150	N
Line contact length [l]		12.7	mm

Figura 87. Introducción de datos Caucho-Acero [40].

RESULTS			
Parameter	Obj-1	Obj-2	Unit
Maximum Hertzian contact pressure [p_{max}]	0.3		MPa
Max shear stress [τ_{max}]	0.1	0.1	
Depth of max shear stress [z]	22.605	22.605	mm
Rectangular contact area width [2b]	57.508		

Figura 88. Resultados Caucho-Acero [39].

En las Figura 89 y 90 se puede observar la distribución del esfuerzo cortante a lo largo del eje Z (se presenta una gráfica para el cuerpo 1 y otra para el cuerpo 2).

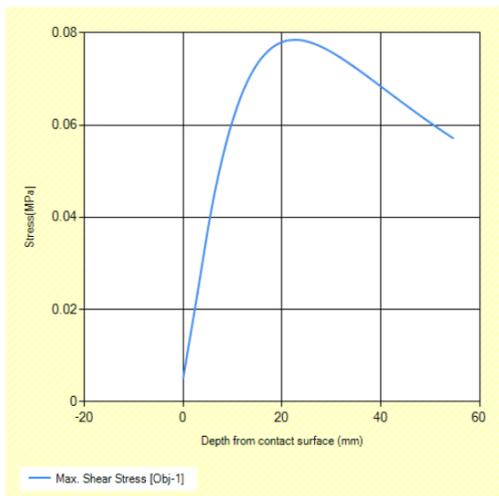


Figura 89. Esfuerzo cortante en objeto 1 [40].

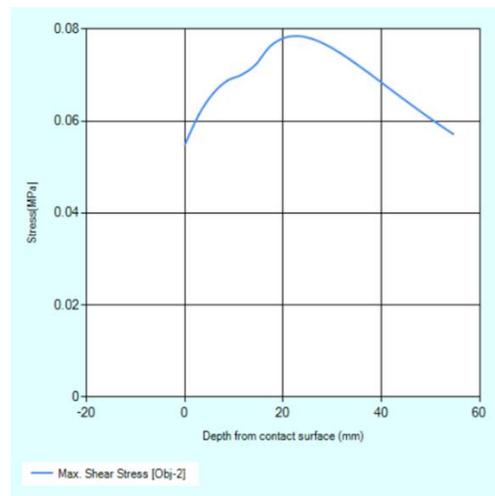


Figura 90. Esfuerzo cortante en objeto 2 [40].

En la gráfica mostrada en la Figura 91, podemos observar la distribución del esfuerzo normal a lo largo del eje X, que en teoría es la ubicación a lo largo la superficie de la probeta.

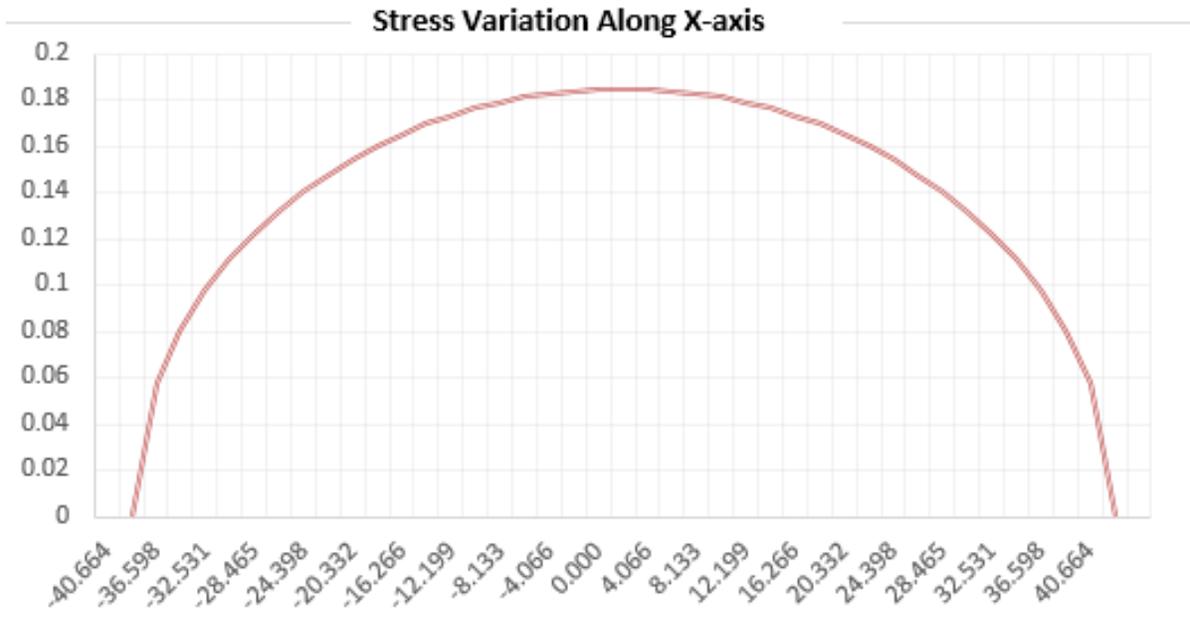


Figura 91. Distribución del esfuerzo a lo largo del eje X [40].

5.3.1.2 Caucho-Aluminio

Para el siguiente análisis considerando el contacto con una probeta de aluminio, se sigue exactamente la misma metodología que en el análisis anterior.

Dimensiones

$$r_1 = 0.1143 \text{ m}$$

$$r_2 = \infty$$

$$L = 0.0127 \text{ m}$$

Módulo equivalente

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} = \frac{1 - .48^2}{.0008} + \frac{1 - .33^2}{70} = 9.62 \times 10^{-7}$$

$$E^* = 1039487.284 \text{ Pa}$$

Radio equivalente

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{.1143} + \frac{1}{\infty}$$

$$R = 0.1143 \text{ m}$$

Semi-ancho del contacto

$$b = \sqrt{\frac{2PR}{\pi LE^*}} = \sqrt{\frac{2(150)(.1143)}{\pi(.0127)(1039487.284)}} = 0.0287539 \text{ m}$$

Área de contacto

$$A = 2b * L = 2(.0287539 \text{ m})(.0127 \text{ m}) = 7.303 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Presión máxima

$$P_{max} = \frac{2P}{\pi bL} = \frac{2(150)}{\pi(.0287539)(.0127)} = 0.2614 \text{ MPa}$$

Para los datos que se introducen en la calculadora en línea (Figura 92), las dimensiones se conservan igual, lo que cambia son los valores del módulo elástico y la razón de Poisson para el objeto 2. En la Figura 93 se presentan los resultados.

INPUT PARAMETERS			
Parameter	Object-1	Object-2	Unit
Object shape	Cylinder ▾	Plane ▾	
Poisson's ratio [v ₁ ,v ₂]	.48	0.33	
Elastic modulus [E ₁ ,E ₂]	.0008	70	GPa ▾
Diameter of object [d ₁ ,d ₂]	.1143		m ▾
Force [F]		150	N ▾
Line contact length [l]		12.7	mm ▾

Figura 92. Introducción de datos Caucho-Aluminio [40].

RESULTS			
Parameter	Obj-1	Obj-2	Unit
Maximum Hertzian contact pressure [p_{max}]	0.3		MPa ▾
Max shear stress [τ_{max}]	0.1	0.1	
Depth of max shear stress [z]	22.605	22.605	mm ▾
Rectangular contact area width [2b]	57.508		

Figura 93. Resultados Caucho-Aluminio [40].

En las Figuras 94 y 95 se puede observar la distribución del esfuerzo cortante a lo largo del eje Z, se presenta una gráfica para el cuerpo 1 y otra para el cuerpo 2 respectivamente.

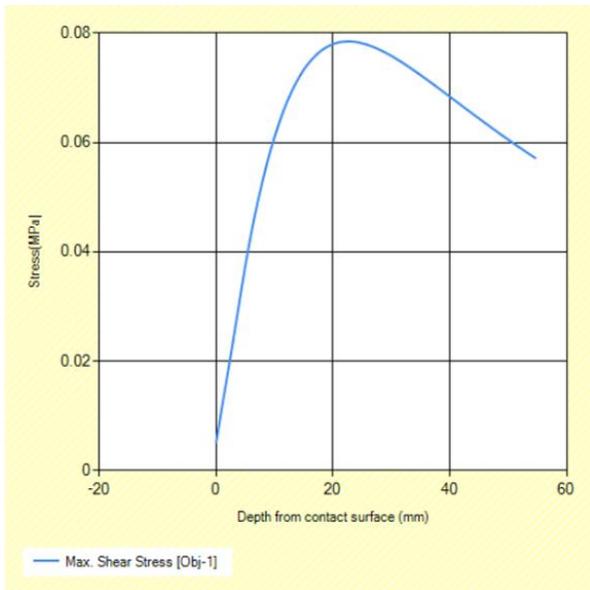


Figura 94. Esfuerzo cortante en objeto [40].

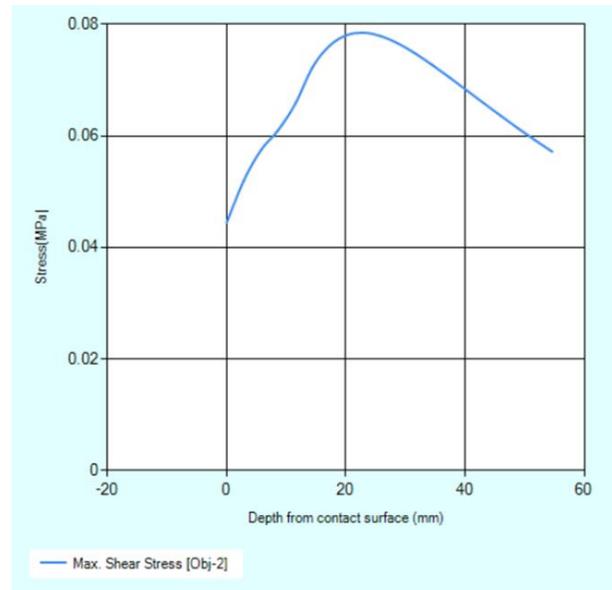


Figura 95. Esfuerzo cortante en objeto [40].

De igual manera que con el contacto pasado, en la gráfica de la Figura 96, podemos observar la distribución del esfuerzo normal a lo largo del eje X.

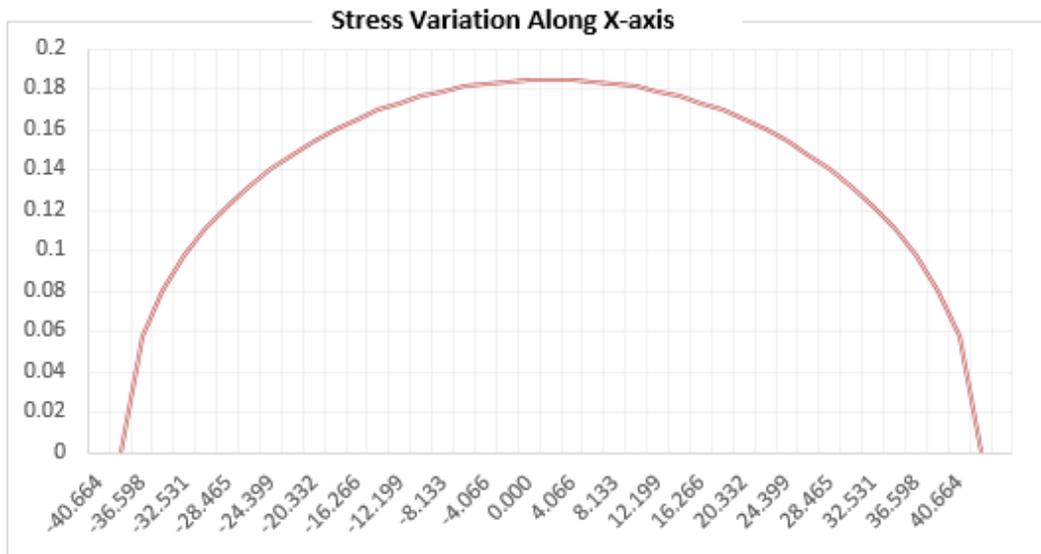


Figura 96. Distribución del esfuerzo a lo largo del eje X [40].

5.3.2 Análisis numérico

5.3.2.1 Configuración del análisis.

Para el análisis numérico se utiliza el software ANSYS, en su módulo de análisis estático estructural.

Primeramente, se realiza el modelo en 2D, el disco se simplifica a la mitad, considerando la sección de acero y el vulcanizado de caucho en el perímetro, también se modela la geometría de la probeta.

Se tienen que dar de alta los diferentes materiales, para este caso se considera acero tanto para el disco, como para la probeta, y caucho para el vulcanizado en el perímetro del disco, en la Figura 97 se observa esta distinción las propiedades fueron cargadas previamente, también se indica el espesor de la superficie y para todos los cuerpos se considera de 12.7 mm.

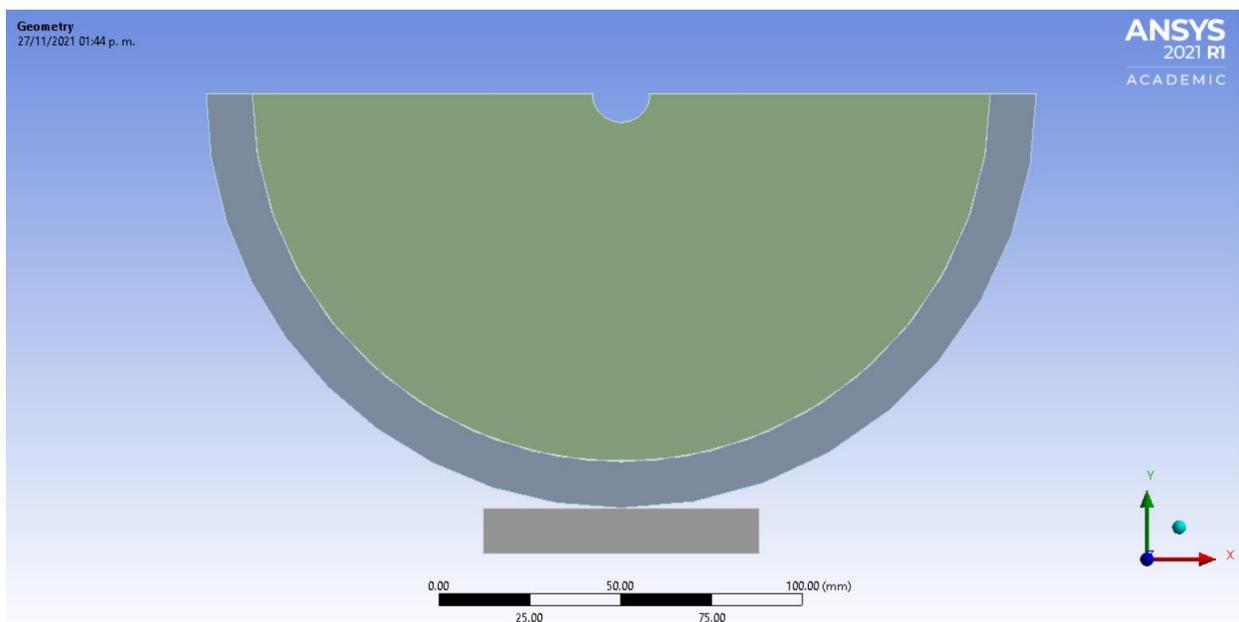


Figura 97. Geometría.

En un segundo paso se determinan los contactos existentes.

El contacto existente entre el disco de acero y el vulcanizado de caucho (Figura 98) se determina cómo “Bonded” dado que este se encuentra fijo y no se busca que tenga ningún desplazamiento.

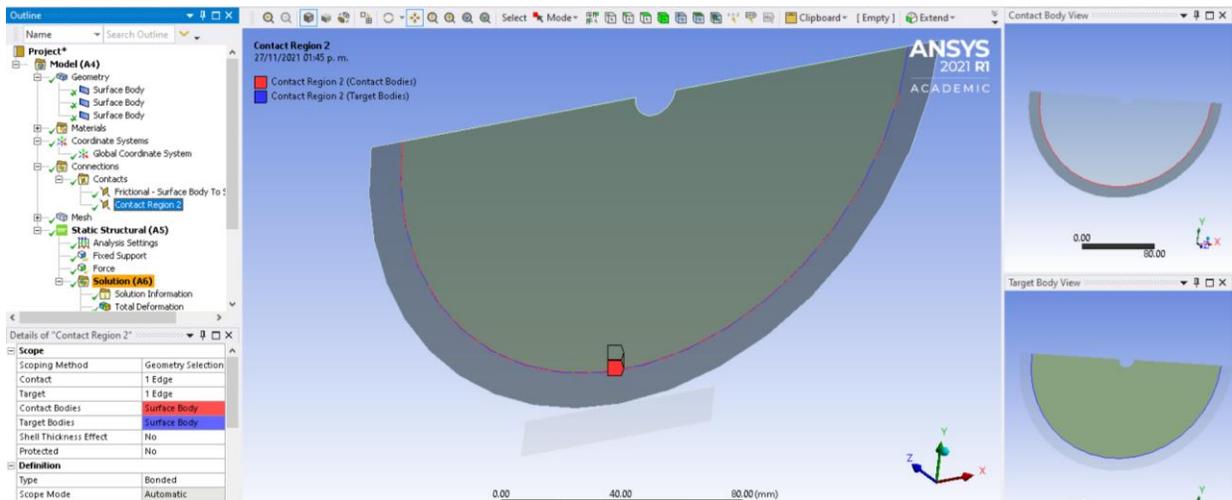


Figura 98. Contacto disco-caucho.

El siguiente contacto que se determina es el existente entre el caucho y la probeta (Figura 99), este es el de mayor interés para el estudio y se considera como “Frictional” con un coeficiente de fricción de 0.4 que se determinó a partir del estudio realizado en el artículo “Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test” [22].

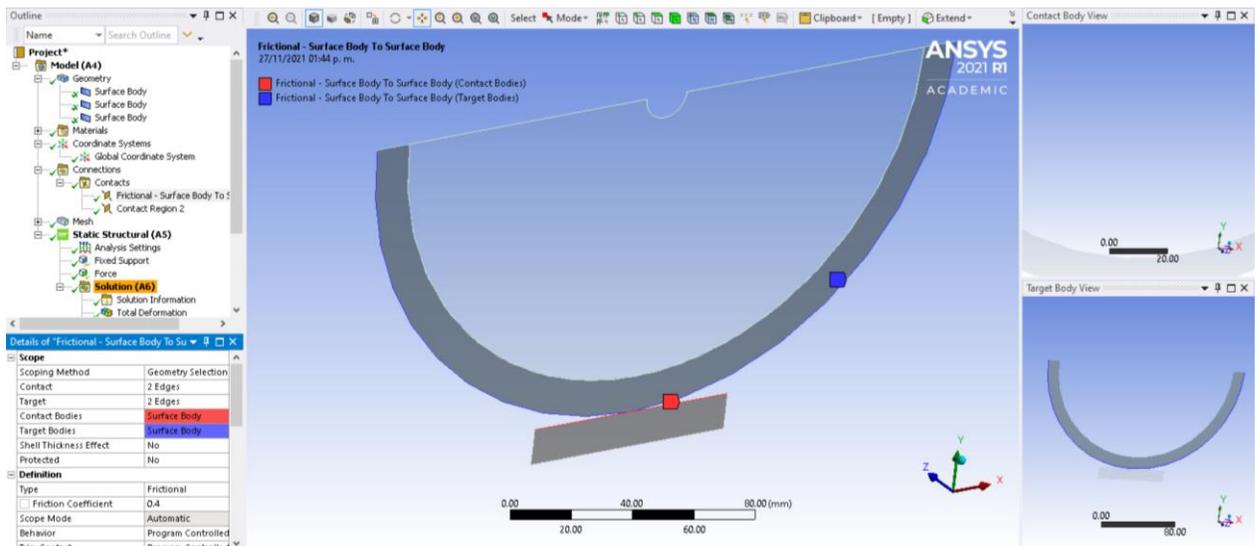


Figura 99. Contacto caucho-probeta.

Una parte importante para un buen análisis es la discretización, como se puede observar en la Figura 100 el refinamiento se enfoca al área del vulcanizado de caucho y a la probeta, se deja de lado la parte del disco de acero dado que la influencia de este será mínima en los resultados, adicional al tamaño de la malla se agrega el método de “Inflation” en las caras que se encuentran en contacto para obtener un mayor número de nodos en esa zona.

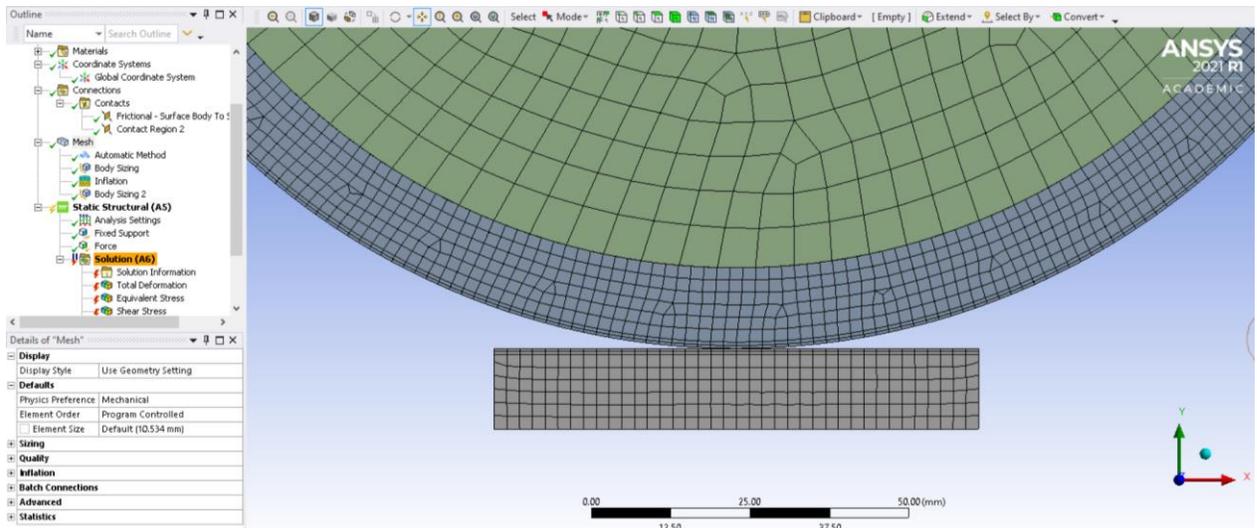


Figura 100. Discretización.

Dadas las propiedades del caucho y que este no tiene un comportamiento lineal, es importante activar la opción de grandes deformaciones en los ajustes del análisis seguido de esto se agregan las condiciones de frontera, en la etiqueta B de la Figura 101 se coloca un soporte fijo y en la etiqueta A se agrega una fuerza de 150 N en dirección positiva del eje Y.

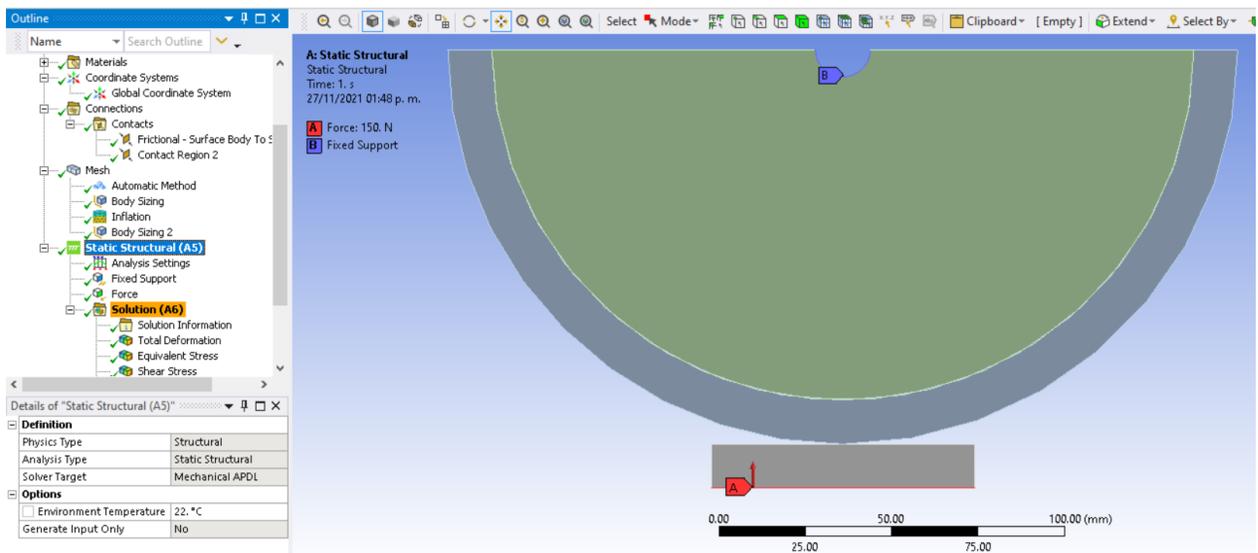


Figura 101. Condiciones de frontera.

5.3.2.2 Caucho-Acero

Ya configurado el programa se le puede dar solución, el primer análisis se hace considerando una probeta de acero. El primer valor que se obtiene es el de la presión máxima de contacto, igual a 0.34 MPa. Con la distribución que se muestra en la Figura 102, para este caso solo se consideran los esfuerzos en la zona de contacto entre el vulcanizado de caucho y la probeta como se muestra a detalle en la Figura 103.

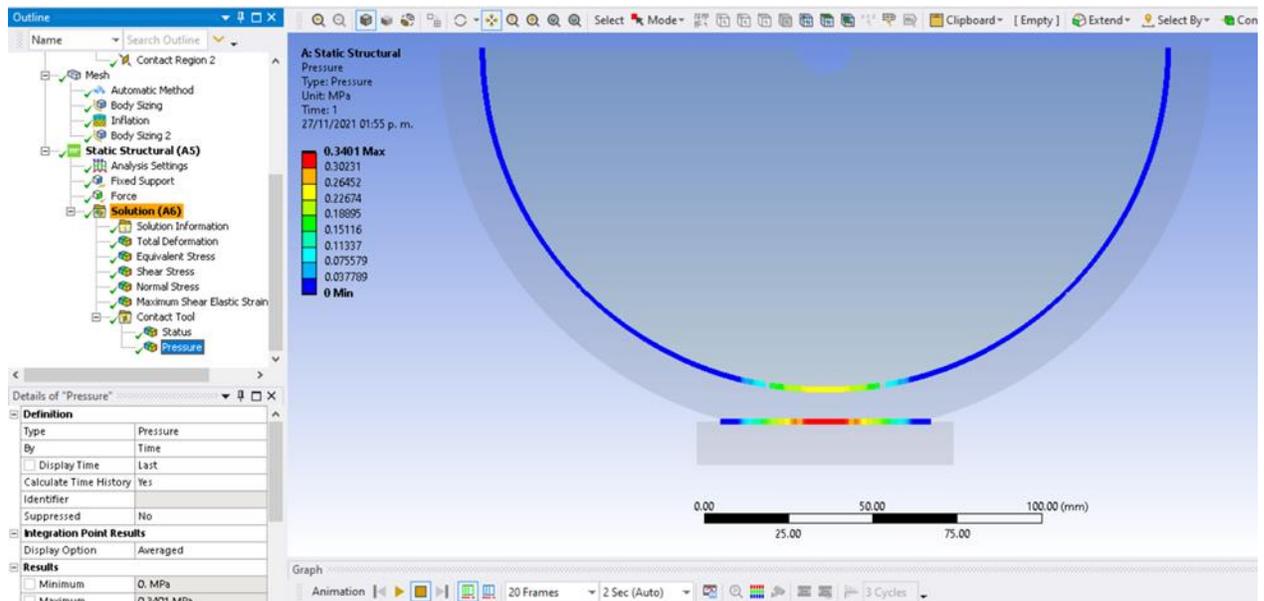


Figura 102. Condiciones de frontera.

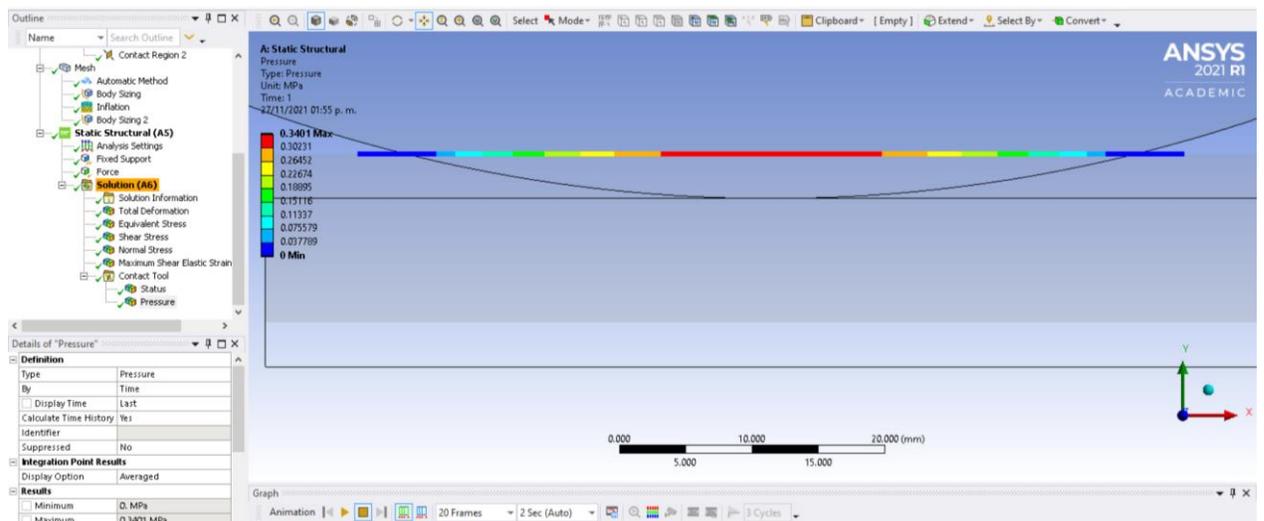


Figura 103. Presión de contacto, a detalle.

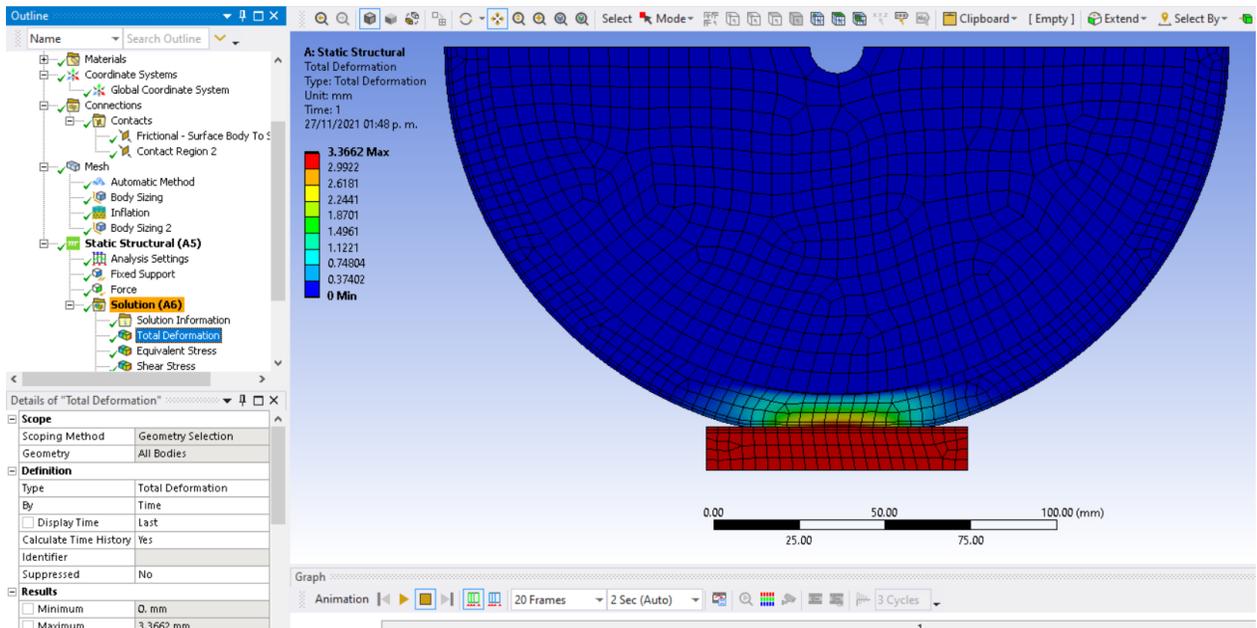


Figura 104. Deformación total.

En la Figura 104 se muestra la deformación total, con un valor de 3.3 mm.

También se obtiene el máximo esfuerzo cortante como se observa en la Figura 105, teniendo este un valor de 0.5 MPa y el esfuerzo de Von Mises con un valor de 2 MPa, el cual se puede apreciar en la Figura 106.

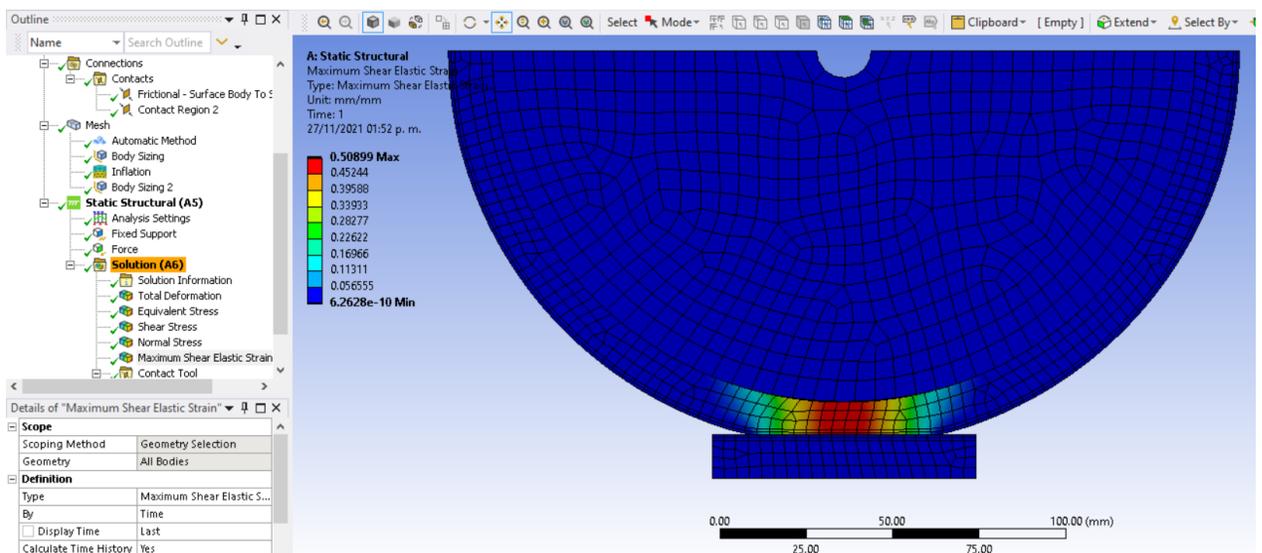


Figura 105. Máximo esfuerzo cortante.

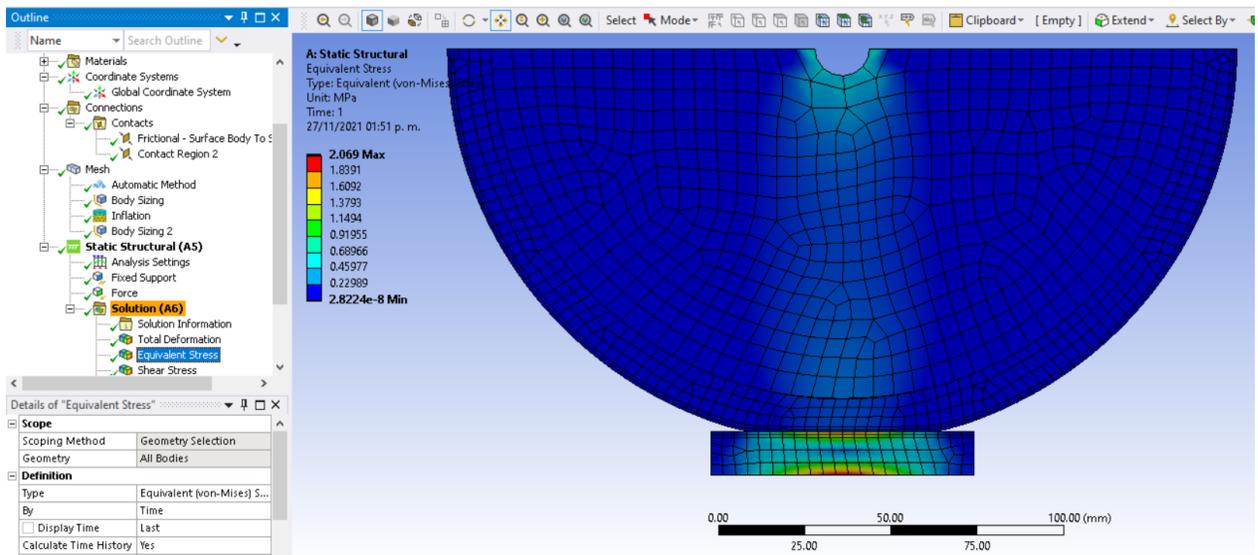


Figura 106. Esfuerzo de Von Mises.

5.3.2.3 Caucho-Aluminio.

Para el análisis del contacto considerando una probeta de aluminio, lo único que se hace es cambiar el material de la probeta y correr el análisis previamente configurado.

Presión de contacto = 0.34 MPa (Figura 107).

Deformación total = 3.36 mm (Figura 108)

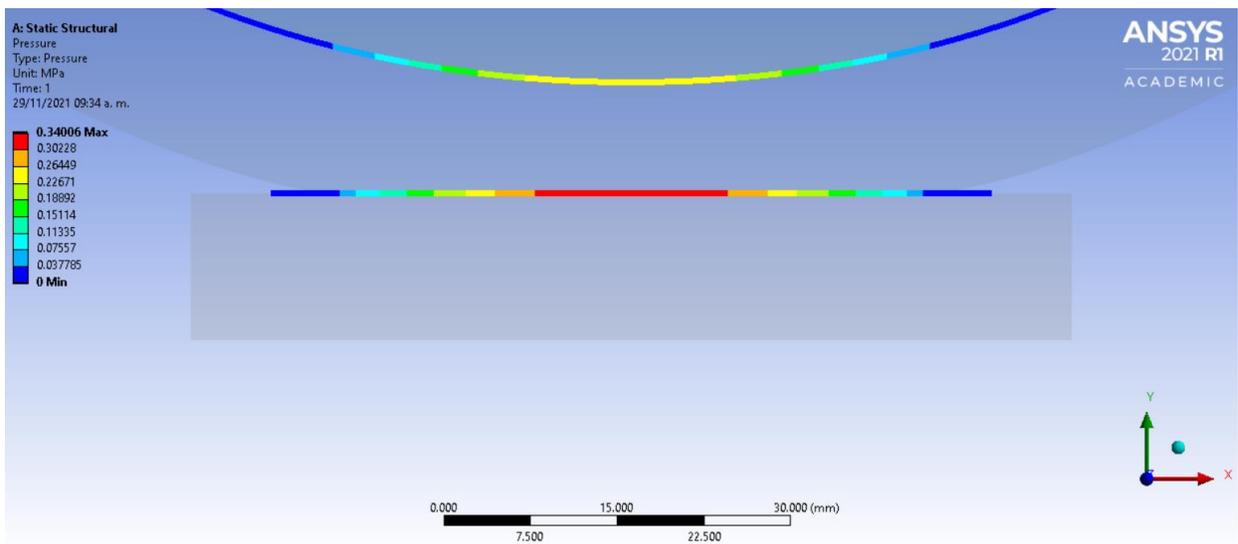


Figura 107. Presión de contacto, Aluminio.

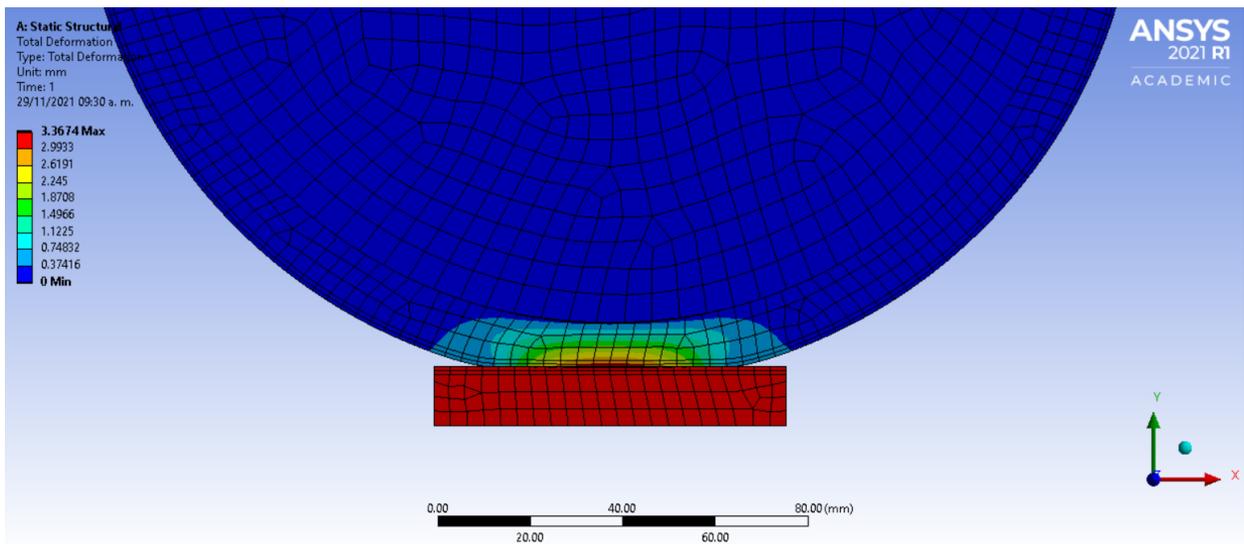


Figura 108. Deformación total, Aluminio.

En la Figura 109 se presenta el esfuerzo máximo de Von Mises, obteniendo un valor máximo de 2.06 MPa. El valor del máximo esfuerzo cortante es de 0.5 MPa y se presenta en la Figura 110.

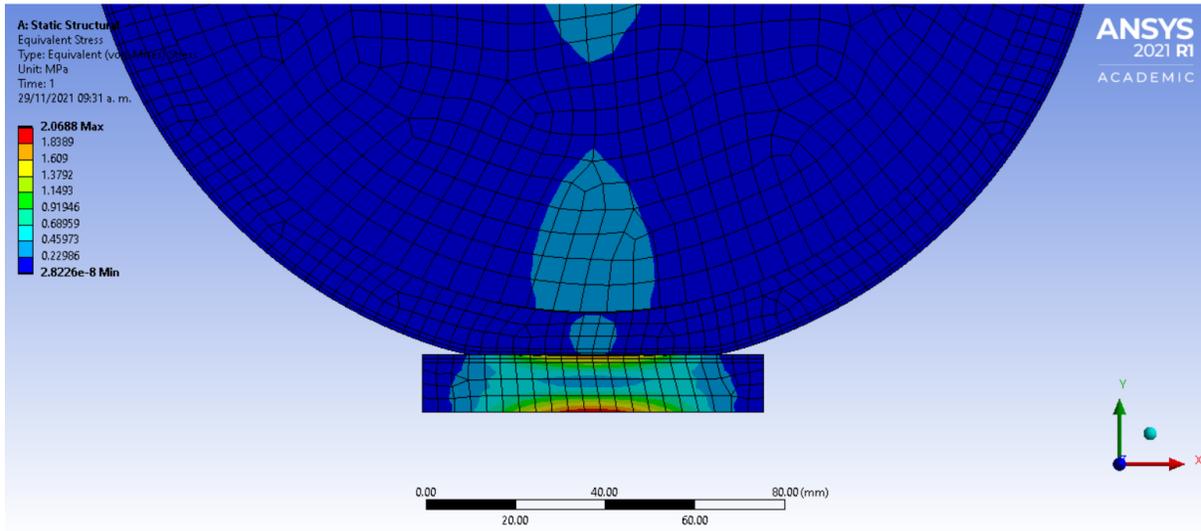


Figura 109. Esfuerzo de Von Mises.

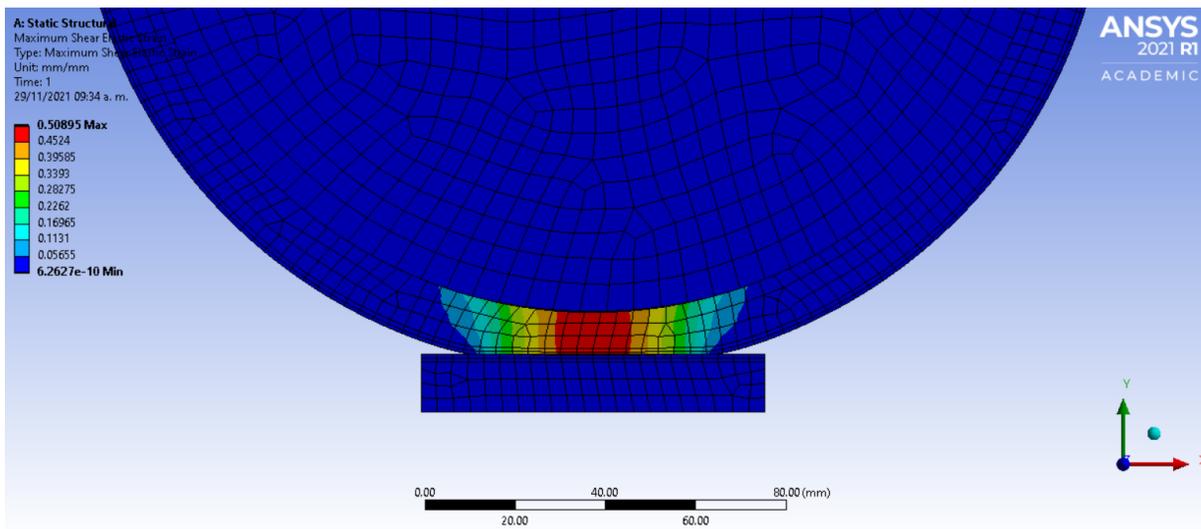


Figura 110. Esfuerzo de Von Mises.

5.3.3 Resultados del análisis de contacto

La Tabla 15 muestra los resultados para el contacto caucho-acero, donde se agrupan los valores obtenidos del estudio y se comparan entre los tres diferentes análisis. Por otra parte, la Tabla 16 indica los resultados obtenidos en el análisis caucho-aluminio.

Tabla 15. Caucho-acero.

<i>Parámetro</i>	<i>Analítico</i>	<i>Calculadora</i>	<i>Ansys</i>
<i>P. max.</i>	<i>0.2615 MPa</i>	<i>0.3 MPa</i>	<i>0.3406 MPa</i>
<i>Cortante max.</i>	<i>N/a</i>	<i>.1 MPa</i>	<i>0.43 MPa</i>
<i>Ancho de contacto</i>	<i>57.508 mm</i>	<i>57.508 mm</i>	<i>N/a</i>
<i>Ubicación del max. Esfuerzo cortante</i>		<i>22.6 mm</i>	<i>6.3 mm</i>
<i>Esfuerzo de Von mises</i>			<i>2.07</i>

Tabla 16. Caucho-aluminio.

<i>Parámetro</i>	<i>Analítico</i>	<i>Calculadora</i>	<i>Ansys</i>
<i>P. max.</i>	<i>0.2614 MPa</i>	<i>0.3 MPa</i>	<i>0.3401 MPa</i>
<i>Cortante max.</i>	<i>N/a</i>	<i>0.1 MPa</i>	<i>0.42 MPa</i>
<i>Ancho de contacto</i>	<i>57.507 mm</i>	<i>57.508 mm</i>	<i>N/a</i>
<i>Ubicación del max. Esfuerzo cortante</i>		<i>22.6 mm</i>	<i>6.3 mm</i>
<i>Esfuerzo de Von mises</i>			<i>2.06</i>

Se observa que al comparar los resultados entre el análisis de la probeta de acero, contra la de aluminio, estos tienen una gran similitud, a pesar de la diferencia en el módulo de elasticidad de ambos materiales.

Al comparar los datos, tanto del esfuerzo de presión máxima, como del cortante y del esfuerzo de Von Mises contra los datos de resistencia de los diferentes materiales utilizados estos no se ven comprometidos dado que los valores se encuentran muy por debajo del esfuerzo máximo que soportan.

5.4 Pruebas preliminares

5.4.1 Preparación de probeta

Para iniciar las pruebas de validación del equipo, lo primero es preparar las probetas, para este caso se ocupan dos materiales diferentes, acero y aluminio, se realizaron 2 pruebas de cada material, las dimensiones son 3"x 1" y 1/2" de espesor, esto para que puedan ser colocadas correctamente en el portaprobeta. Las 2 probetas se pueden observar en la Figura 111.

También es importante tomar la dureza y la rugosidad. El acabado que indica la norma ASTM G-65 es uno donde la rugosidad sea menor a 0.8 μm . Para la prueba de rugosidad se utilizó un rugosímetro de la marca Mitutoyo (Figura 112) los valores obtenidos se muestran en la Tabla 17. Otro punto importante es conocer la masa en gramos de cada probeta para que una vez terminada la prueba se vuelvan a pesar y así obtener la masa perdida.

Tabla 17. Valores de dureza y rugosidad.

Muestra	Dureza	Rugosidad
Acero AISI 1020	122 HBN	0.05 μm
Aluminio 6061	102 HBN	0.14 μm



Figura 111. Probetas.



Figura 112. Toma de rugosidad.

5.4.2 Preparación del equipo

Las 2 pruebas de cada material se realizaron utilizando el proceso B indicado por la norma ASTM G65. Los parámetros usados en la prueba se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores de dureza y rugosidad.

Parámetros de prueba				
Carga	Velocidad de rueda	Distancia de abrasión	Duración de la prueba	Abrasivo
70 N	180 RPM	1436 m	11 minutos	SiC F80

La pieza a ensayar se coloca en el portaprobetas como se observa en la Figura 113, justo debajo de la boquilla. La tolva superior se carga con el abrasivo a usar (Figura 114), una carga completa es suficiente para 40 minutos de operación del equipo.



Figura 113. Ubicación de la probeta.

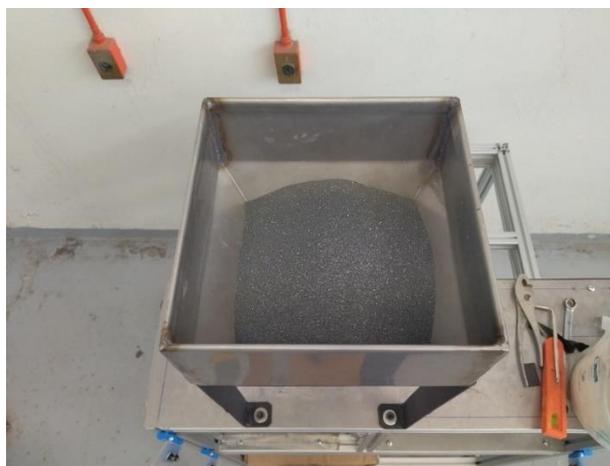


Figura 114. Abrasivo.

5.4.3 Resultados de la prueba y discusión

En la Tabla 19 se puede observar el valor del volumen perdido de cada prueba, se puede observar que la probeta de aluminio fue la que perdió mayor cantidad de material, el valor del volumen perdido fue calculado a partir de la ecuación número 26.

$$\text{Volumen perdido (mm}^3\text{)}: \frac{\text{masa perdida (g)}}{\text{densidad } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \times 1000 \dots\dots\dots (26)$$

La masa perdida es la diferencia entre masa final y la masa inicial y tanto estas masas, como la densidad se indican en la Tabla 19.

Entre la prueba 1 (P1) y prueba 2 (P2) de cada material se observa una variación no mayor al 2% entre cada ensayo, con esto se puede garantizar la homogeneidad de los resultados obtenidos.

Tabla 19. Resultados de la prueba.

Resultados				
Muestra	Densidad	Masa inicial	Masa final	Volumen perdido
Aluminio 6061	2.7 g/cm ³	P1 69.0841 g	67.9444 g	422.1111 mm ³
		P2 67.9444 g	66.8242 g	414.8888 mm ³
Acero AISI 1020	7.8 g/cm ³	P1 198.0101 g	196.4593 g	198.8205 mm ³
		P2 196.4593 g	194.9115 g	198.4358 mm ³

Se vuelve un poco complicado encontrar pruebas en las que se utilicen los mismos parámetros y materiales que se usaron en las pruebas de validación, dado que normalmente se adaptan a las necesidades del estudio realizado en el momento, la norma ASTM G-65 indica que una manera de validar una máquina de este tipo en verificar la homogeneidad de los resultados como fue mostrado en el punto anterior. También se cuenta con datos de la perdida de volumen en probetas de acero 1090 [19] y fundición gris ASTM 48-64 [15], utilizando parámetros cercanos a los usados en la máquina de abrasión desarrollada, esto nos permite verificar que los resultados son cercanos a los obtenidos, si bien las propiedades de los materiales no son las mismas que las del acero 1020 que se ensayó, al obtener valores cercanos entre cada prueba, como se muestra en la Tabla 20, esto ofrece una visión del correcto funcionamiento de la máquina.

Tabla 20. Comparación de volumen perdido.

Material	Volumen perdido
Acero 1020 (prueba realizada con el equipo aquí construido)	198,4358 mm ³
Fundición gris ASTM 48-64	162.9907 mm ³ [15]
Acero 1090	160.48 mm ³ [19]

En la probeta del lado izquierdo, mostrada en la figura 115, se puede observar la huella de desgaste generada por el abrasivo y el disco de caucho, en la muestra de aluminio. Mientras que del lado derecho se muestra el resultado de la probeta de acero.

Si comparamos ambas, en la muestra de aluminio se observa una huella de desgaste más amplia , debido a la mayor pérdida de material a comparación de la de acero.



Figura 115. Probetas ensayadas.

6. Conclusiones

- Con ayuda de la metodología de Nigel Cross se logró obtener un diseño conceptual, en el que se determinaron las variables de diseño y alternativas de solución, así como las demandas impuestas por la norma ASTM G65, priorizando la funcionalidad, fácil utilización y bajo costo para el diseño final de la máquina.
- Una vez realizado el análisis de contacto se observa que las presiones generadas en la zona de contacto son pequeñas y no influyen en los cálculos de diseño.
- En cuestión a la selección del motorreductor se determina que uno con un valor de velocidad cercano a las revoluciones indicadas por la norma ASTM-G65 puede ser adaptado, siempre y cuando se respete la distancia de abrasión necesaria para cada prueba de abrasión.
- Al validar la confiabilidad de las primeras pruebas realizadas, se observan resultados positivos y un correcto funcionamiento de la máquina, de igual manera sucede esto al comparar los resultados de pruebas ya realizadas en otros trabajos con parámetros similares.

Referencias

- [1] B. Bhushan, "Introduction to Tribology", Second edition, Columbus, Ohio USA, Wiley, 2013
- [2] B. Bhushan, "Modern Tribology Handbook" (Mechanics and materials science series), Florida USA, CRS Press, 2001
- [3] N. Núñez, E. Esteban, H. Méndez y J. Ruiz, "Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición del desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G-65", *Prospectiva*, vol. 7, no. 1, pp. 53-58, enero 2009.
- [4] J. Marulanda, A. Meneses y C. Estrada, "Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma técnica ASTM G-65", *Scientia et Technica*, no. 41, pp. 373-378, mayo de 2009.
- [5] N. Cross, "Métodos de Diseño", Primera edición, México, Limusa, 2002
- [6] P. Strzałkowski, U. Kazmierczak and M. Wolny "Assessment of the method for abrasion resistance determination of sandstones on Böhme abrasion test apparatus", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. Springer, vol. 79, pp. 4947–4956, June 2020
- [7] T. Umar, C. Egbu and M. Saidani "A Modified Method for Los Angeles Abrasion Test", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, Springer, May 2019
- [8] B. Liu, W. Li, X. Lu, X. Jia and X. Jin, "The effect of retained austenite stability on impact abrasion wear resistance in carbide-free bainitic steels", *Wear*, Elsevier, 2019
- [9] D. Chandramohan, B. Murali, P. Vasantha and S. Dinesh, Mechanical, "Moisture Absorption, and Abrasion Resistance Properties of Bamboo–Jute–Glass Fiber Composites", *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, Springer, vol. 5, no. 66, 2019
- [10] R. Abid, N. Hilo and H. Daek, "Experimental tests on the underwater abrasion of Engineered Cementitious Composites", *Construction and Building Materials*, Elsevier, vol. 171, pp. 779-792, 2018.
- [11] A. Gant, J. Nunn, M. Gee, D. Gorman, D. Gohil and L. Orkney "New perspectives in hardmetal abrasion simulation", *Wear*, Elsevier, vol. 2, no. 14, 2017
- [12] F. Macias, F. Dahl and A. Bruland "New Rock Abrasivity Test Method for Tool Life Assessments on Hard Rock Tunnel Boring: The Rolling Indentation Abrasion Test (RIAT)" Springer 2015
- [13] L. Brito, "Análisis del efecto del contenido de molibdeno y vanadio en la resistencia a la abrasión de una fundición blanca Fe-23Cr-3C", Universidad de Chile, Memoria para optar como ingeniero, Santiago de Chile, 2017

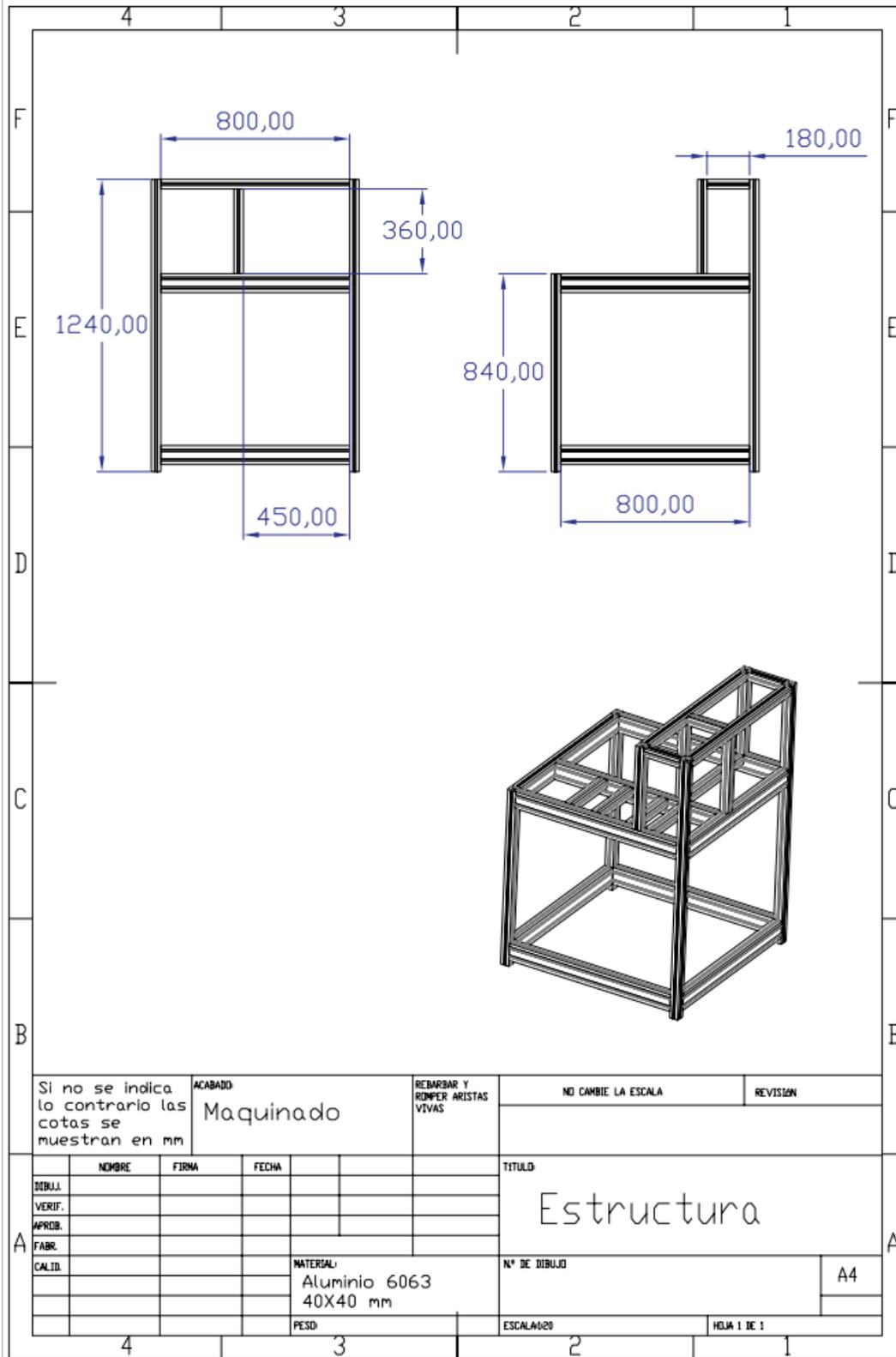
- [14] K. Budinski and S. Budinski, "On replacing three-body abrasion testing with two-body abrasion testing", *Wear*, Elsevier, 2017
- [15] W. Quintero, J. Flórez y M. Sanabria, "Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65", *Scientia et Technica*, vol. 20, no. 3, pp. 217-224, septiembre de 2015.
- [16] R. Namdeo y S. Tiwari, "Development of rubber wheel abrasion testing machine for estimation of three body abrasive wear of automobile components", *International Journal on Design & Manufacturing Technologies*, vol. 9, no. 1, pp. 1-5, January 2015
- [17] R. Yanes, L. Hernandez and O. Morera, "Design and fabrication of a machine for test in abrasive wearing according to ASTM G65 standard", *Open science*, no. 5, vol. 2, pp 86-90, November 2014
- [18] J. Trinidad, J. Amengual y G. Caram, "Diseño de una Máquina Para Ensayos de Abrasión Seca & Abrasión Húmeda", in *Eleventh Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, agosto 2013
- [19] A. Doering, D. Danks, S. Mahmoud and J. Scott, "Evaluation of ASTM G65 abrasive — Spanning 13 years of sand", *Wear*, vol 271, pp. 1252-1257, January 2011
- [20] S. Nahvi, P. Shipway and D. McCartney, "Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test", *Wear*, vol. 267, pp. 2083-2091, October 2009
- [21] S. Wirojanupatump and P. Shipway, "Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus", *Wear*, vol. 239, pp 91-10, April 2000
- [22] A. Stevenson and I. Hutchings, "Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test", *Wear*, vol. 195, pp. 232-240, February 1996
- [23] J. Castro. "Análisis de esfuerzos hertzianos de elementos de máquinas en Matlab" Universidad EAFIT, Medellín, 2005.
- [24] V. Sabelkin and S. Mall, *Elastic-Plastic Multi-Asperity Contact Analysis of Cylinder-on-Flat Configuration*, ASME, Vol. 129, pp. 292-304, abril 2007.
- [25] J. Martínez, H. Plascencia, E. Pérez, M. Torres y E. Aguilera "Análisis numérico-experimental de un contacto estático entre dos rodillos", *Memorias del XVII congreso internacional anual de la SOMIM*, pp. 103-110, septiembre 2011.
- [26] J. Carro, F. Flores y I. Flores, "Análisis de esfuerzo de contacto en engranes rectos aplicando el criterio de Hertz con ingeniería asistida por computadora", *IPN, Científica*, vol. 16, núm. 1, pp. 25-32, enero-marzo 2012.
- [27] T. Doca, M. Pires, "Analysis of a cylinder-to-flat contact problem at finite elasto-plastic strains", *DEMEC*, Elsevier, mayo 2014

- [28] C. Rodriguez, F.Gonzaleza, G.Tarnowskia, H. Bordóna, y M. Rosenbergerc, “Análisis de esfuerzos durante el contacto mecánico de materiales elásticos”, ANALES AFA, Vol. 27, No.4
- [29] Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus, ASTM, G 32-10, pp. 1-19, 2010
- [30] Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM, G 65 – 00, pp. 1-12, 2001
- [31] Standard Practice for Liquid Impingement Erosion Testing, ASTM, G 73-98, pp. 1-19, 1998
- [32] Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, ASTM, G 76-04, pp. 1-6, 2004
- [33] Standard Test Method For Ranking Resistance Of Materials To Sliding Wear Using Block-On-Ring, ASTM, G 77-17, pp. 1-12, 2017
- [34] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, ASTM, G 99-04, pp. 1-5, 2004
- [35] Standard Test Method for Measuring Abrasion Resistance of Materials by Abrasive Loop Contact, ASTM, G 174-03, pp. 1-6, 2003
- [36] F. Díaz Del Castillo, “Perfiles estructurales” UNAM, Departamento de ingeniería, México, 2019-01
- [37] R. Budynas y J. Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley”, Novena edición, México, Mc Graw Hill, 2011
- [38] Moas Modular Aluminum System,” Perfil de aluminio ranurado 40”, <https://moasperfiles.com.mx /PDF/Ficha%20t%C3%A9cnica %20Perfil%2040x40.pdf>
- [39] D. William y Callister, Jr. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”, Primera edición, Barcelona, Reverte, 1995.
- [40] Ames web, “Hertzian Contact Stress Calculator” <https://amesweb.info/HertzianContact/HertzianContact.aspx>

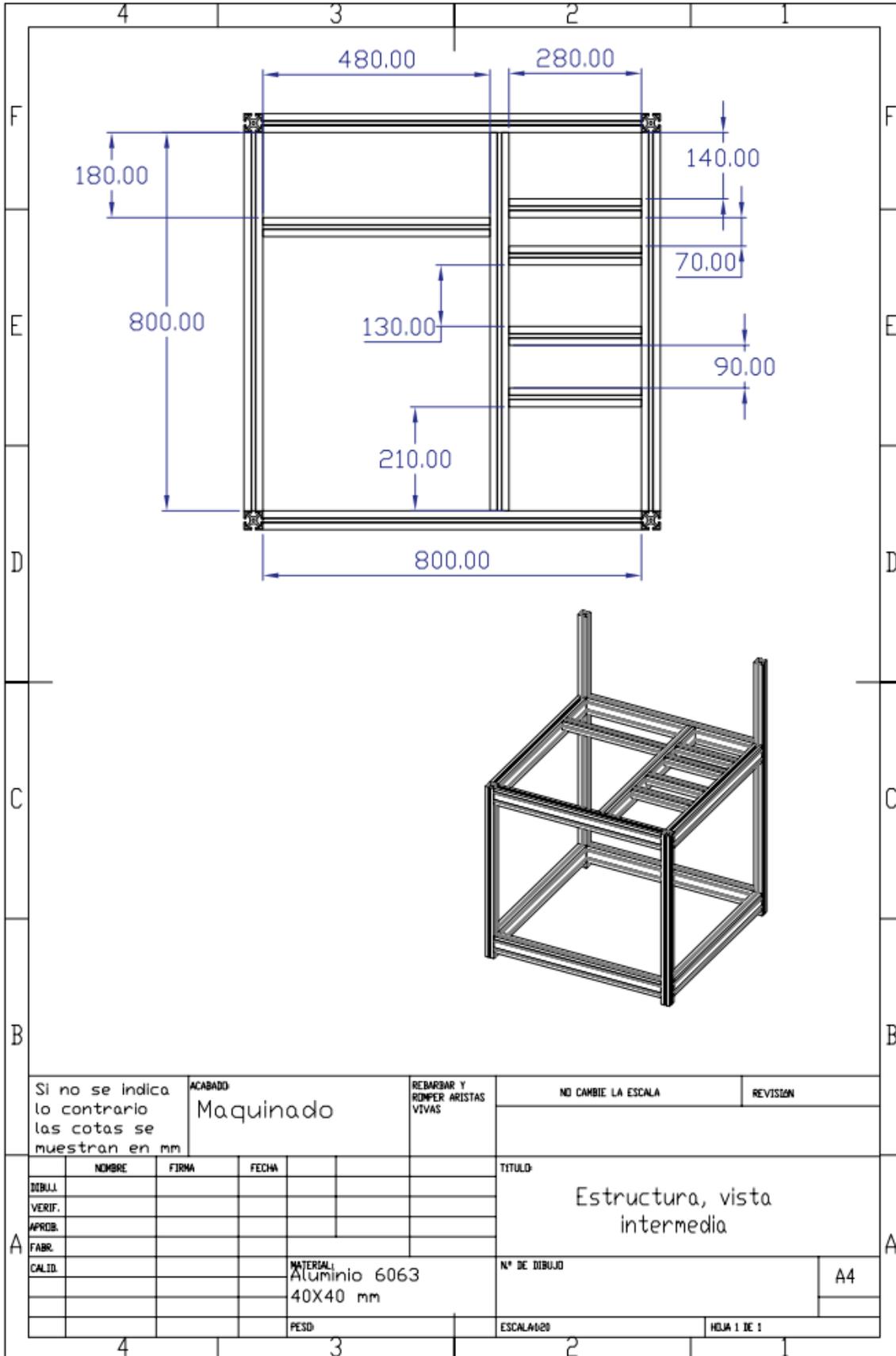
Anexos

Anexo 1. Planos

Plano 1

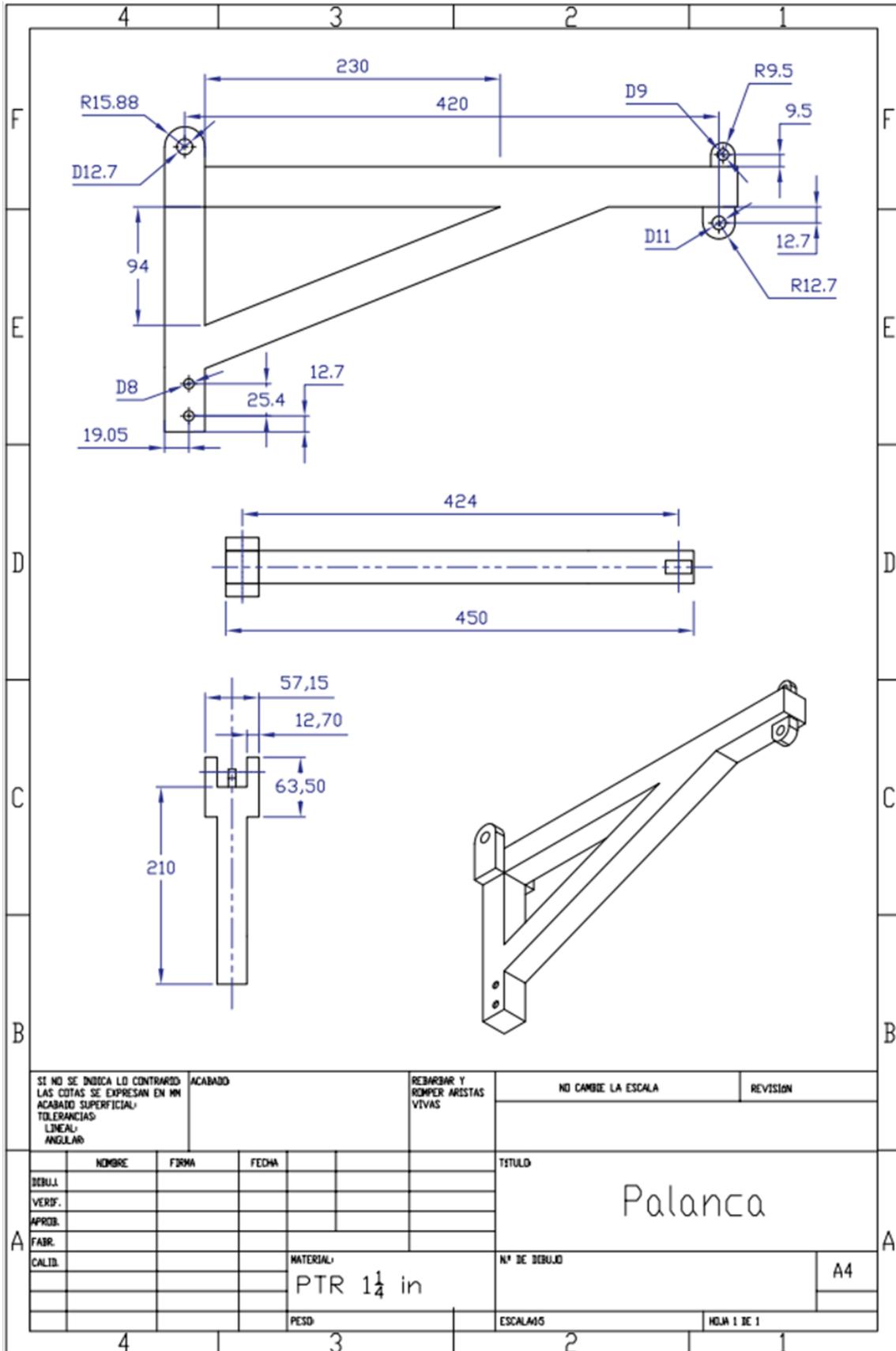


Plano 2



Si no se indica lo contrario las cotas se muestran en mm		ACABADO Maquinado		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISION	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TITULO			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		Estructura, vista intermedia			
FABR.		CALID.		MATERIAL Aluminio 6063 40X40 mm		N° DE DIBUJO		A4	
PESD		ESCALA: 1:20		HOJA 1 DE 1					

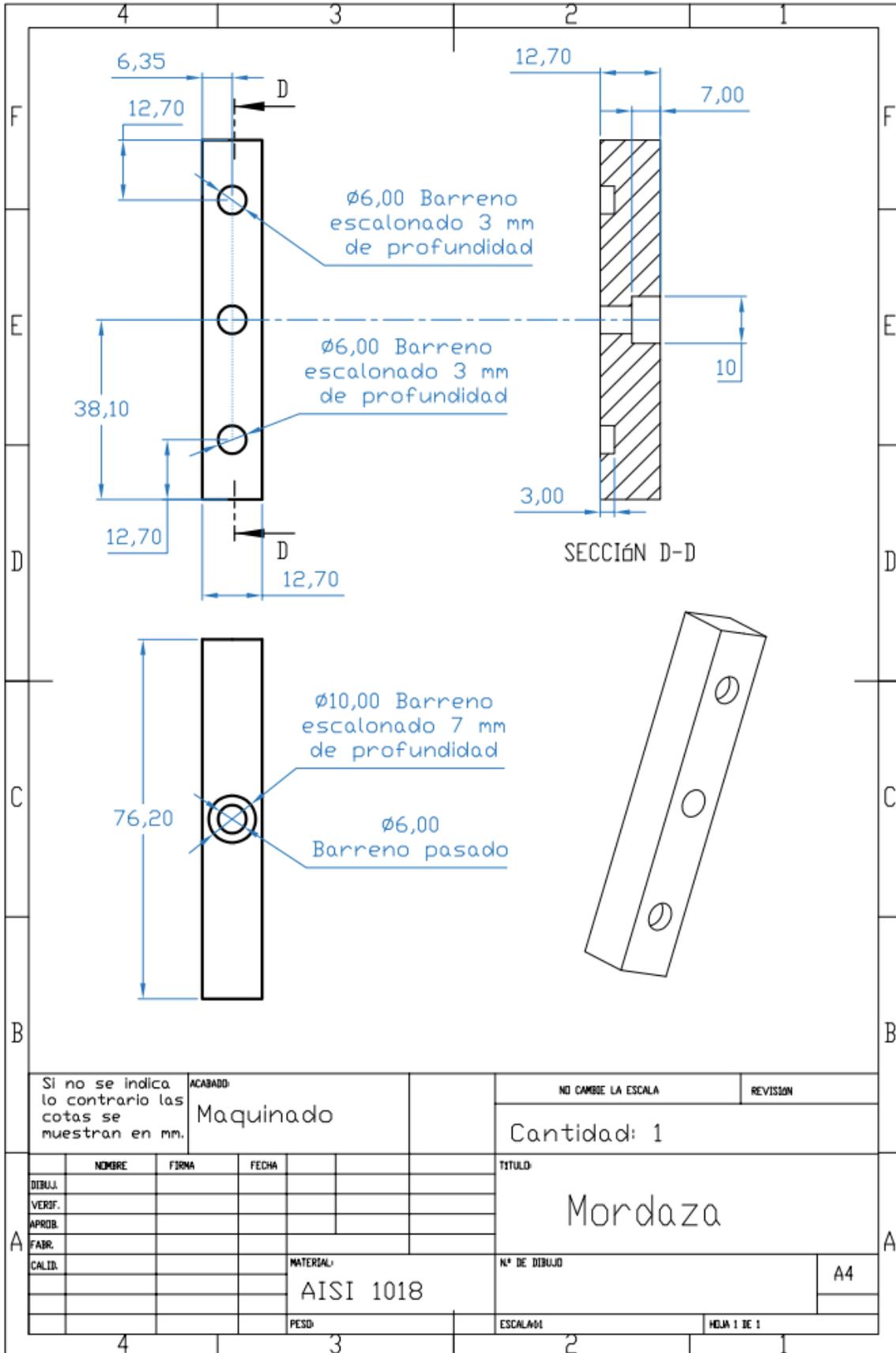
Plano 3



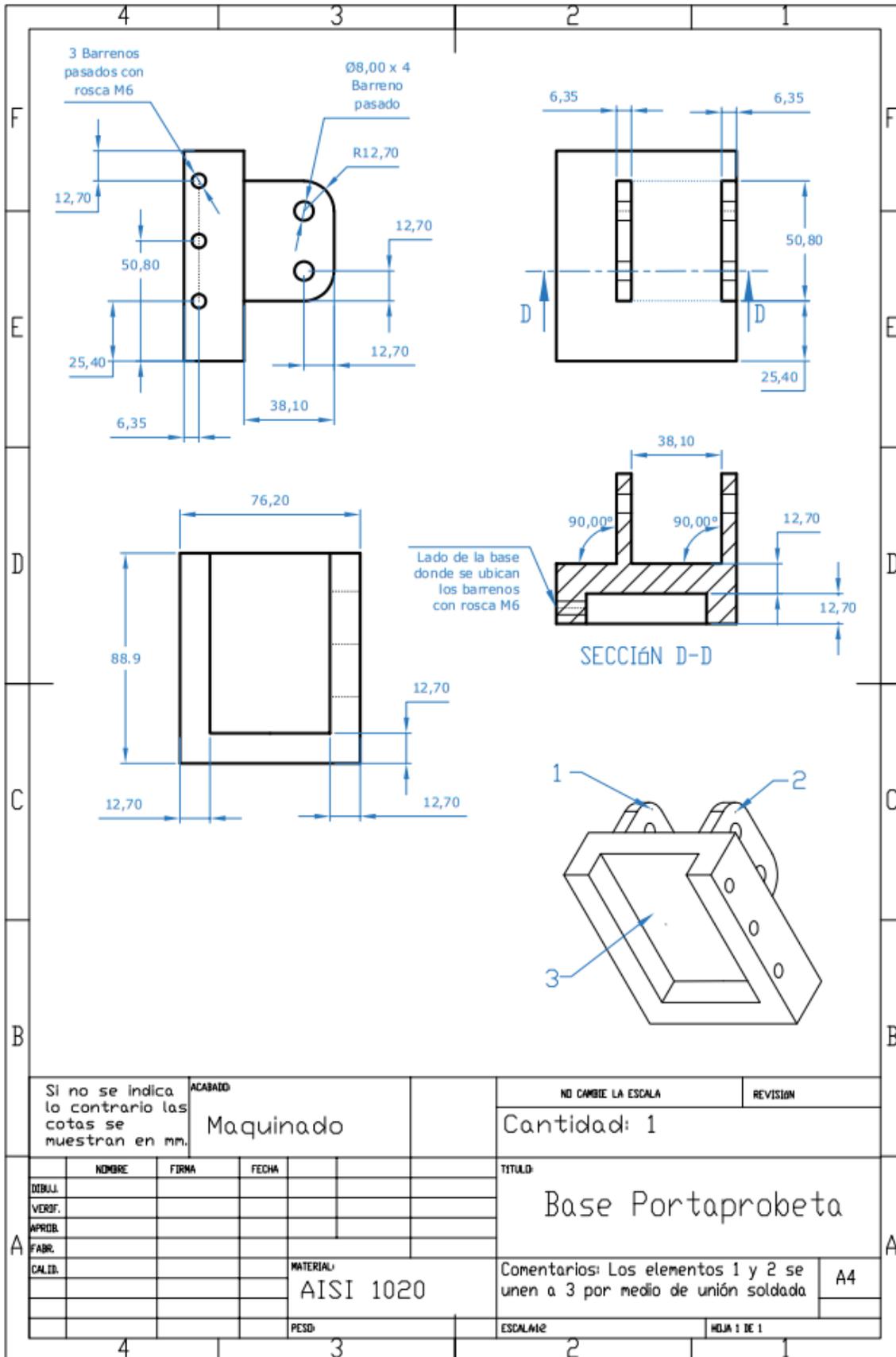
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
---	---------	---------------------------------	---------------------	----------

NOMBRE			FECHA			TITULO		
DIBUJ.						Palanca		
VERIF.								
APROB.								
FABR.								
CALIB.			MATERIAL:			N° DE DIBUJO		
			PTR 1 1/4 in			A4		
			PESO			ESCALAS		
						HOJA 1 DE 1		

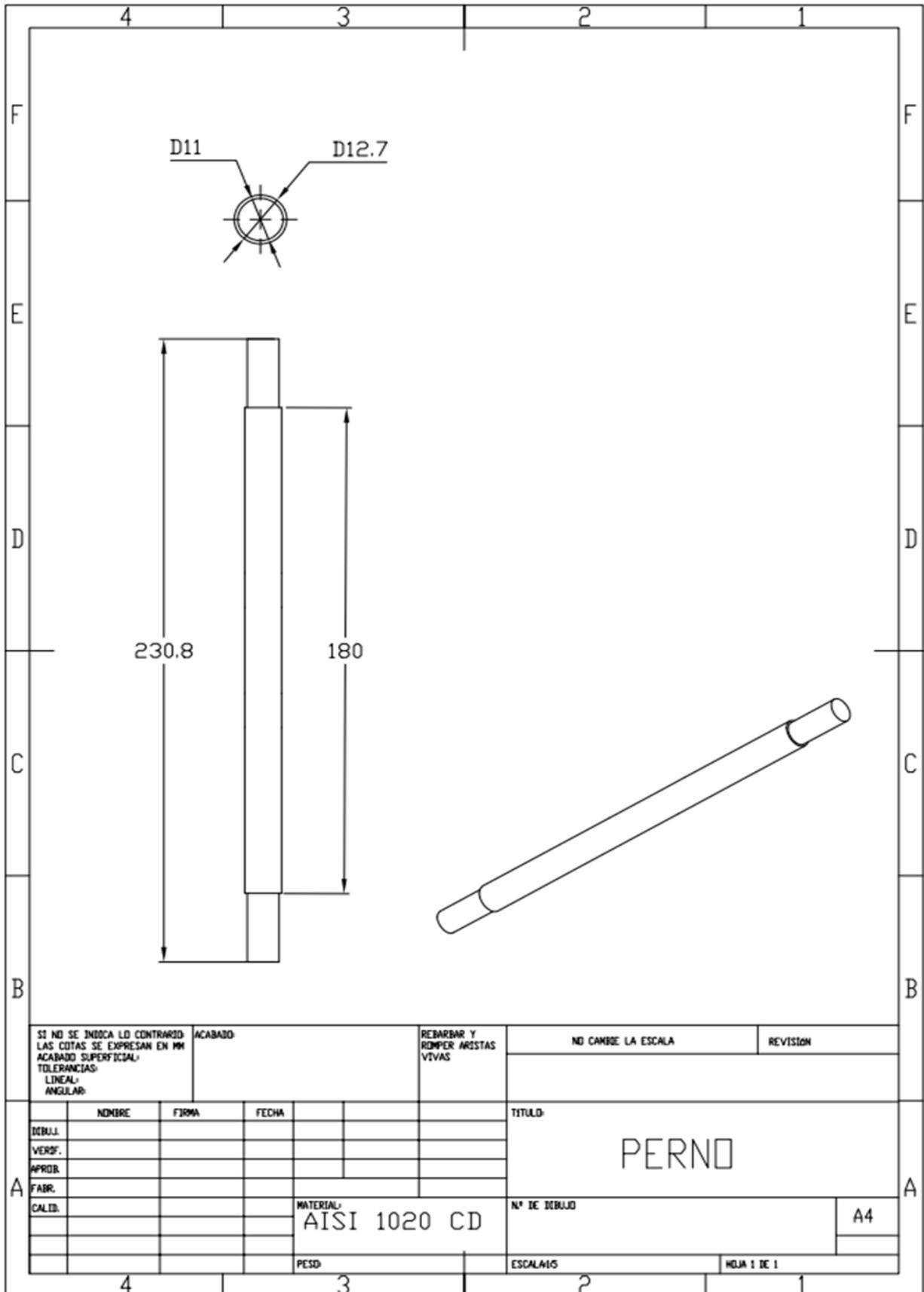
Plano 4



Plano 5

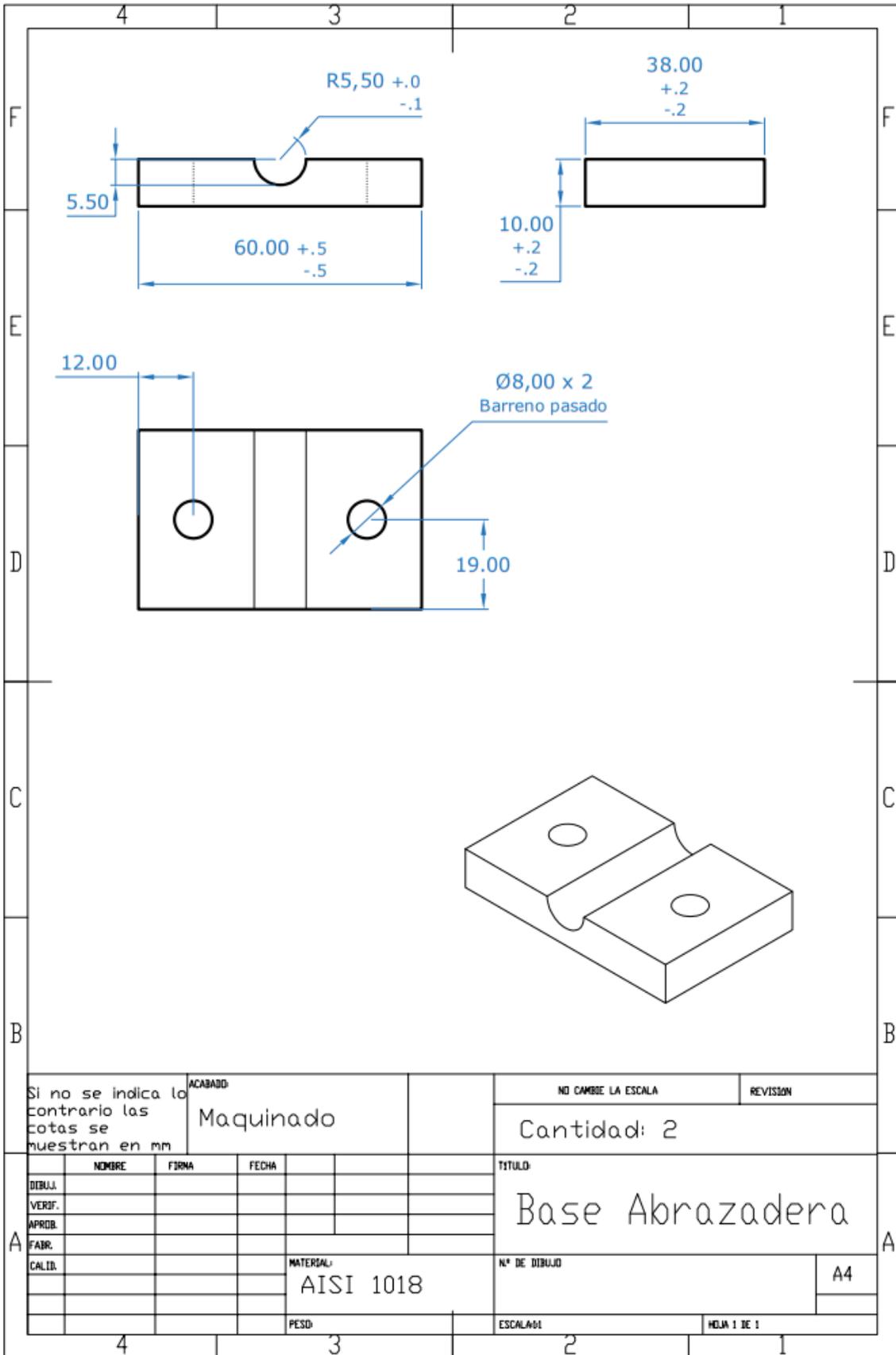


Plano 6



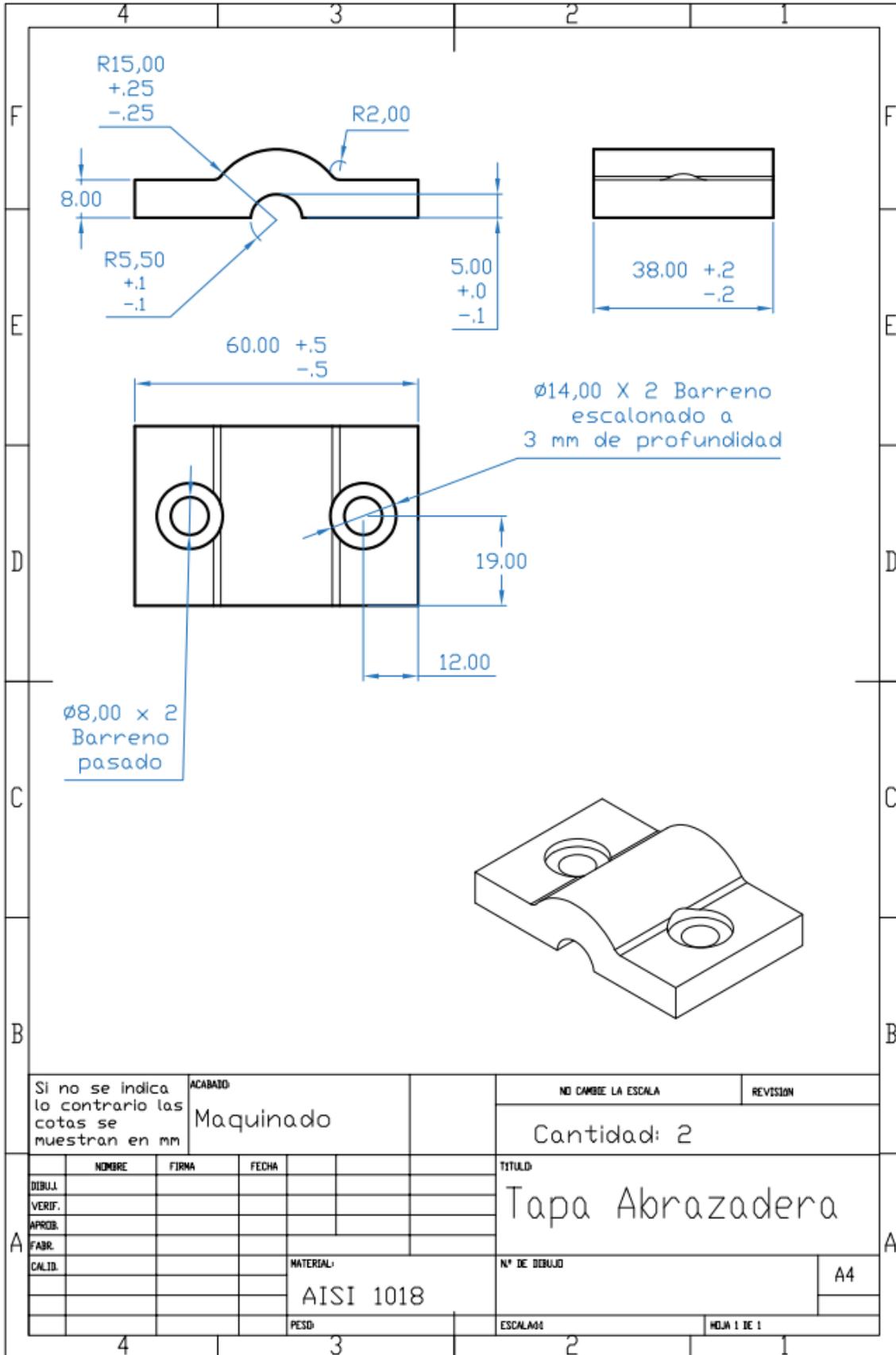
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISION	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TITULO:			
DEB.J.						PERNO			
VERDF.									
APROB.						N° DE DEB.J.			
FABR.						A4			
CALIB.						MATERIAL: AISI 1020 CD			
						PESO: ESCALAS: HOJA 1 DE 1			

Plano 7

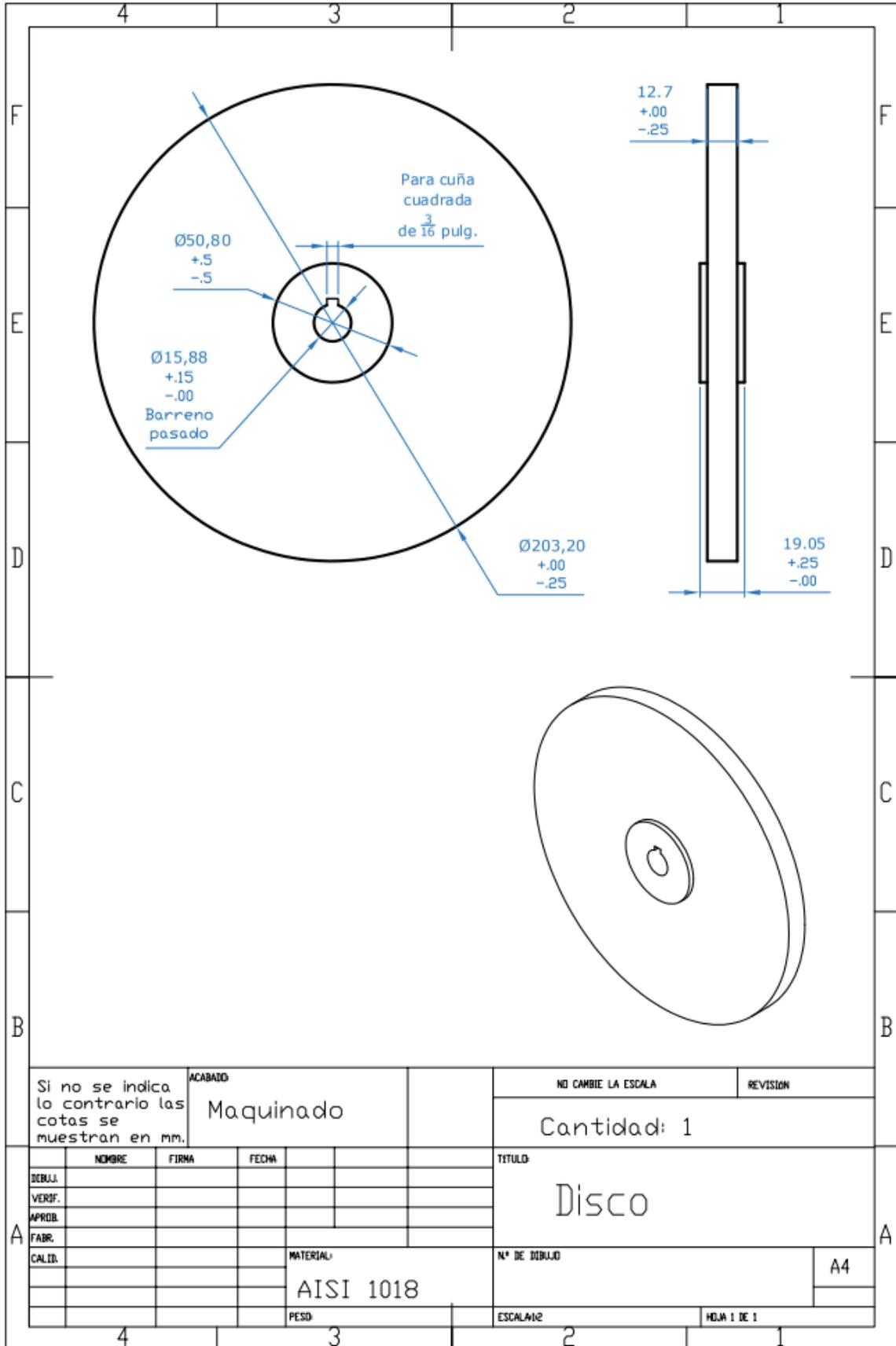


Si no se indica lo contrario las cotas se muestran en mm		ACABADO: Maquinado		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISION
		Cantidad: 2				
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TITULO Base Abrazadera		
DIBUJ.				N° DE DIBUJO		
VERIF.				A4		
APROB.				MATERIAL: AISI 1018		
FABR.				ESCALA: 1		
CALIB.				HOJA 1 DE 1		
			PESO:			

Plano 8



Plano 9



Si no se indica lo contrario las cotas se muestran en mm.

ACABADO
Maquinado

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISION

Cantidad: 1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DEB.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TITULO

Disco

MATERIAL:
AISI 1018

N° DE DIBUJO

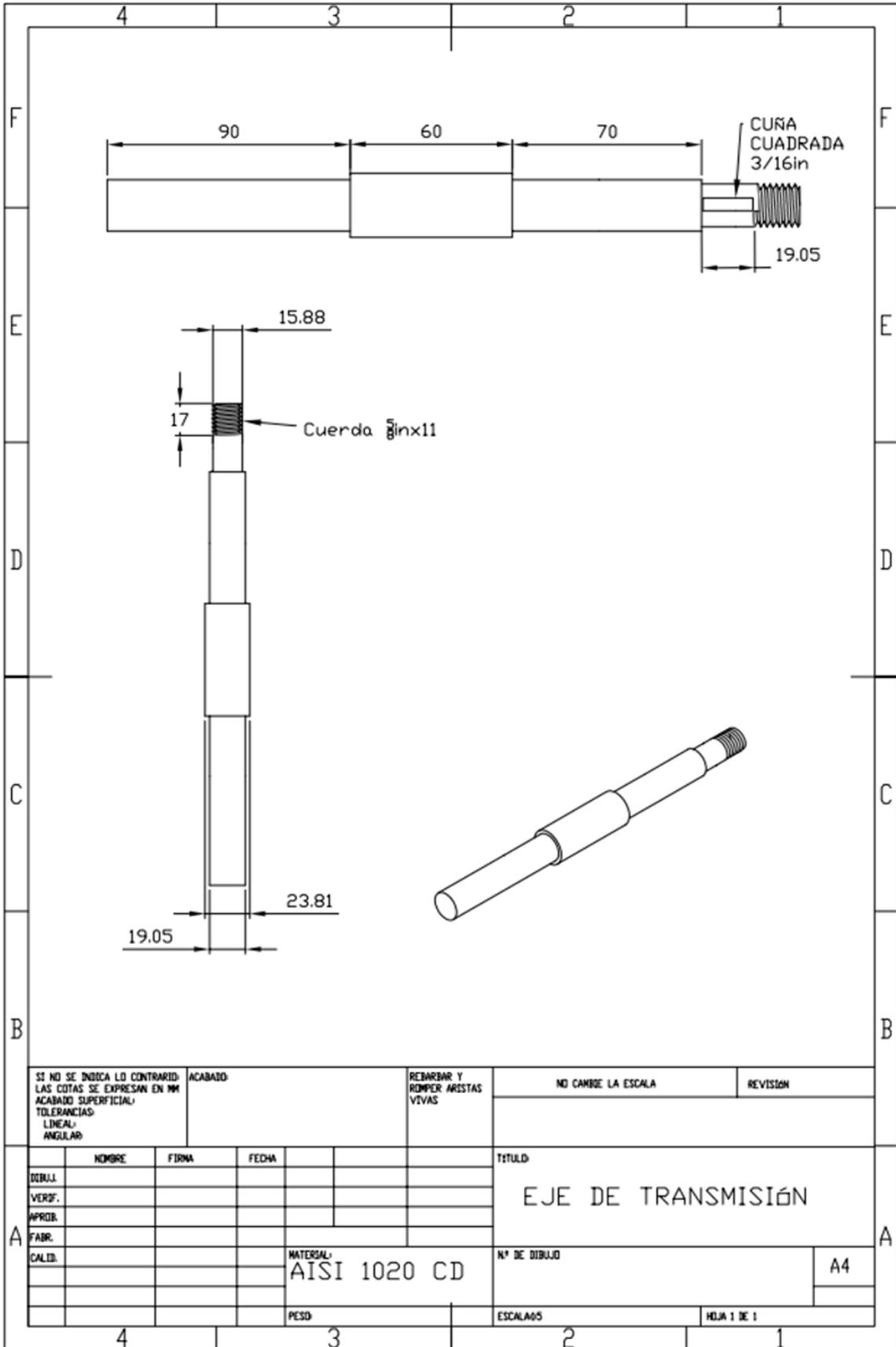
A4

PESO

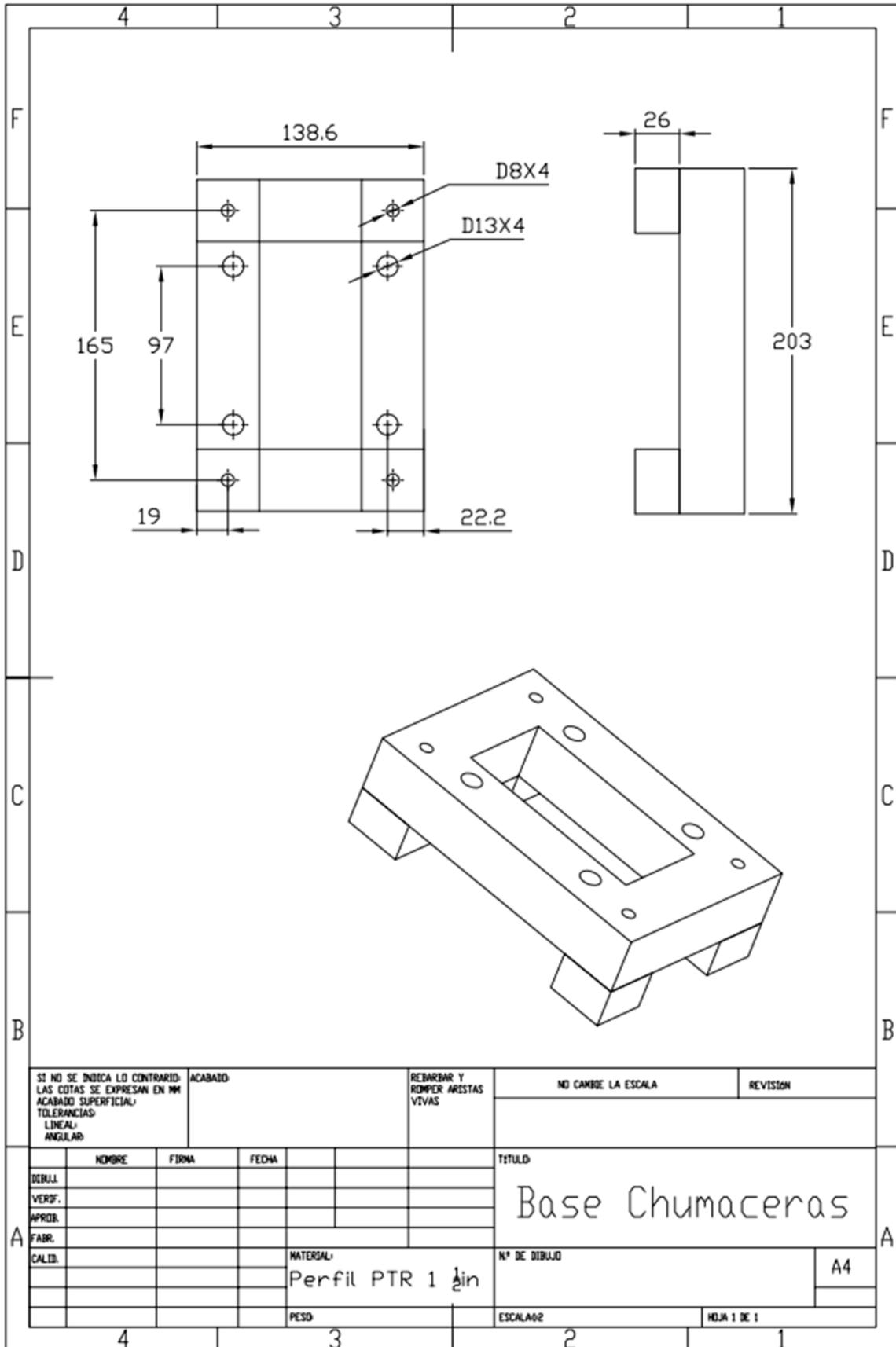
ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1

Plano 10



Plano 11



Anexo 2. Costos

Unidad	Cantidad	Descripción	Precio unitario	Total
Metros	8	Perfil aluminio 40x80 mm.	\$624.00	\$4992.00
Metros	10	Perfil aluminio 40x40 mm.	\$321.00	\$3210.00
Pieza	40	Sujetador 40 mm, ranura 8mm.	\$41.00	\$1640.00
Pieza	40	Tuerca plana para perfil de 40 mm.	\$8.80	\$352
Pieza	4	Pie nivelador serie 40, base 80 mm.	\$221.00	\$884.00
Pieza	2	Rueda giratoria sin freno 3"	\$177.00	\$354.00
Pieza	2	Rueda giratoria con freno 3"	\$241.00	\$482.00
Pieza	4	Tapa plástica 40x40 mm.	\$18.00	\$72.00
Pieza	40	Tornillo M8x16 mm.	\$7.80	\$312.00
Pieza	-----	Tornillos y turcas varios	-----	\$400.00
Pieza	-----	Maquinados varios	-----	\$13500.00
Pieza	1	Motorreductor trifásico, 1HP.	\$12080.00	\$12080.00
Pieza	-----	Control eléctrico	-----	\$2584.00
Pieza	1	Llave de paso	\$169.00	\$169.00
Pieza	1	Lamina acero inoxidable	\$2600.00	\$2600.00
Pieza	1	Hoja de acrílico	\$2100.00	\$2100.00
Pieza	4	Bisagras	\$80.00	\$320.00
Pieza	2	Manija de puerta	\$90.00	\$180.00
Metro	3	Solera 1x1/4	\$55.00	\$165.00
Metro	3	PTR 1 1/2	\$120.00	\$360.00
Metro	3	Solera 2x1/8	\$55.00	\$165.00
Pieza	2	Chumaceras 3/4	\$190.00	\$380.00
Pieza	1	Acople tipo estrella	\$310.00	\$310.00
			TOTAL	\$47,611.00

Anexo 3

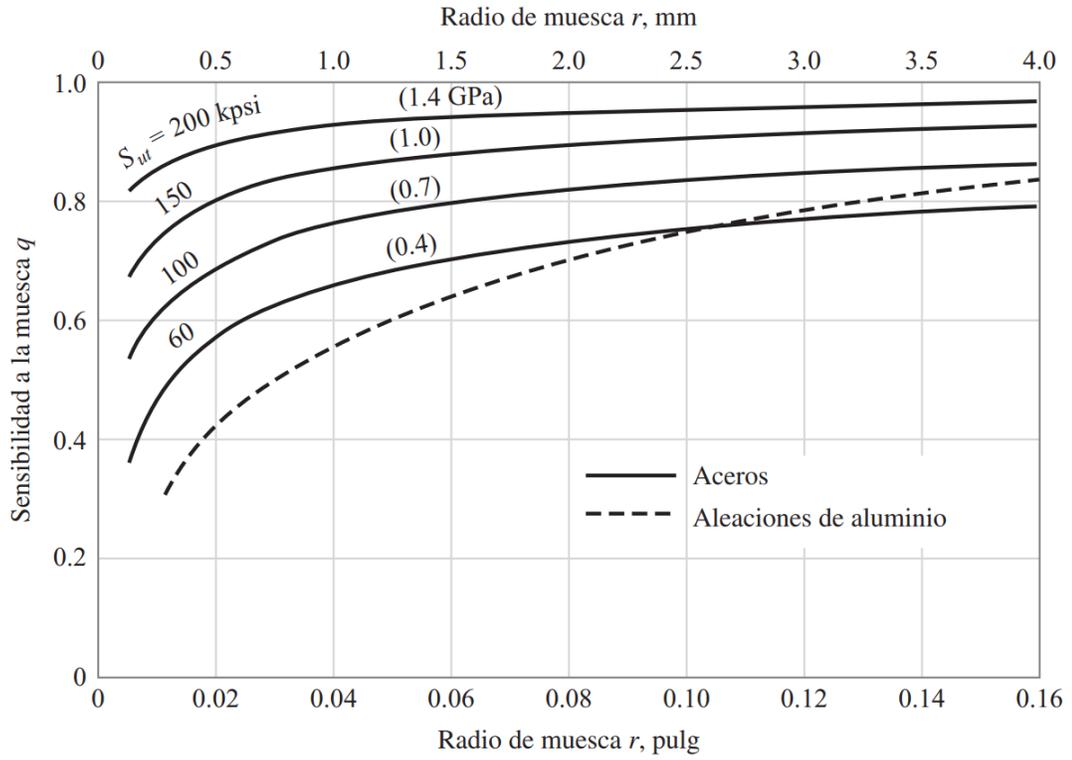


Figura 6.20 [37]

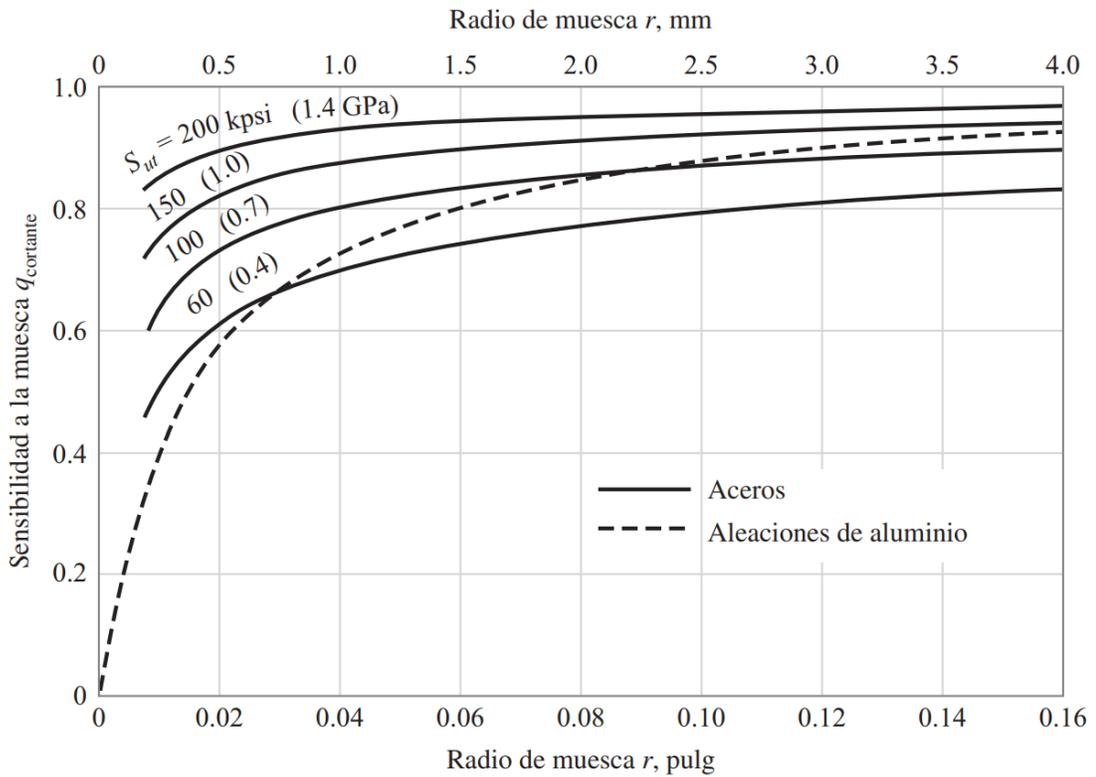


Figura 6.21 [37]

Productos académicos

Constancia de participación como ponente en el XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM.



SOMIM XXVII CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL
Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica "Diseñando mejores sistemas para el uso sustentable de la energía"

50
ANIVERSARIO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE PACHUCA

LA SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA MECÁNICA, A.C.
OTORGA EL PRESENTE RECONOCIMIENTO
Por su valiosa participación como **PONENTE** a:
Luis Antonio Martínez Butrón

Al presentar el artículo
AI_44 "Diseño de máquina de abrasión por rueda de caucho empleando la metodología de Nigel Cross"
durante el XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM celebrado del 22 al 24 de septiembre de 2021 en el Instituto Tecnológico de Pachuca.


Dr. Simón Martínez Martínez
Presidente de la SOMIM


TECNM
TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO


HIDALGO
crece contigo

A1a. DISEÑO MECÁNICO

“Diseño de máquina de abrasión por rueda de caucho empleando la metodología de Nigel Cross”

MARTÍNEZ-BUTRÓN, Luis^{a*}, VERA-CÁRDENAS, Edgar^a, ABUNDIS- FONG, Hugo^a, MORENO-RÍOS, Marisa^a

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Pachuca, Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Colonia Venta Prieta, CP. 42080, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

*Autor de contacto. Dirección de correo electrónico: m14200675@pachuca.tecnm.mx

RESUMEN

En muchos de los equipos mecánicos se presenta el fenómeno de desgaste por abrasión, por lo que se hace importante realizar pruebas experimentales para su estudio y así tratar de corregir los efectos negativos de este fenómeno.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una máquina que permita hacer pruebas de desgaste por abrasión bajo la norma ASTM G65.

Para el desarrollo de este equipo se utilizó la metodología de diseño propuesta por Nigel Cross, para posteriormente iniciar con el análisis y simulación del diseño final con el apoyo de software CAD-CAE.

Con ayuda de esta metodología se logró seleccionar la mejor alternativa de diseño entre las generadas para las diferentes subfunciones, siempre cuidando que se cumplan con los objetivos y requerimientos propuestos, así como los indicados por la norma ASTM-G65. A partir del diseño conceptual desarrollado, se está en la posibilidad de iniciar el diseño a detalle.

Palabras Clave: Desgaste abrasivo, máquina para ensayos, metodología de diseño, Norma ASTM-G65.

ABSTRACT

In many mechanical equipment the phenomenon of abrasive wear occurs, so it is important to perform experimental tests for its study and thus try to correct the negative effects of this phenomenon.

The objective of this project is to develop a machine to perform abrasion wear tests under the ASTM G65 standard.

For the development of this equipment, the design methodology proposed by Nigel Cross was used, to later start with the analysis and simulation of the final design with the support of CAD-CAE software.

With the help of this methodology, it was possible to select the best design alternative among those generated for the different subfunctions, always taking care to comply with the proposed objectives and requirements, as well as those indicated by the ASTM-G65 standard. Based on the conceptual design developed, it is possible to start the detailed design.

Keywords: Abrasive wear, testing machine, design methodology, Standard ASTM-G65.

1. Introducción

La tribología es la ciencia y tecnología que estudia la lubricación, la fricción y el desgaste de partes móviles [1]. El desgaste abrasivo es generado por las partículas duras que se introducen entre dos superficies más blandas, que se deslizan o interactúan entre sí [2]. En la mayoría de los procesos industriales y componentes mecánicos se presenta el desgaste por abrasión y los principales efectos negativos causados por este fenómeno son la disminución de la vida útil del elemento y su deformación o mal funcionamiento del sistema. Por tal razón es importante su estudio, con la finalidad de corregir o disminuir estos efectos, pero la mayoría de las

veces no se cuenta con el equipo necesario para realizar ensayos experimentales del fenómeno y el estudio se limita a los resultados obtenidos por métodos numéricos.

Dentro de los trabajos relevantes sobre máquinas para realizar ensayos de abrasión, se pueden encontrar aparatos donde se han implementado diseños para lograr pruebas tanto de abrasión húmeda como seca en un solo dispositivo, regido por las normas ASTM G65 y ASTM G105 [3]. Se han logrado instrumentar máquinas de abrasión por rueda de caucho para la medición y análisis de las variables, así como el control de los diferentes parámetros inmersos en la prueba [4,5]. De igual manera se ha experimentado con el uso de galgas extensiométricas para la medición de la fuerza de fricción presente durante la prueba [6].

Otro aspecto importante que se ha estudiado durante el desarrollo de dispositivos de ensayo bajo la norma ASTM G65, es el abrasivo usado, ya sea que se estudie el uso de abrasivos con características parecidas a las recomendadas por la norma [7] o que se estudien varias muestras de abrasivo comercial para esta prueba. Lo anterior es para comprobar la homogeneidad de propiedades y asegurar la confiabilidad en los ensayos [8]. También se analiza el efecto de la aplicación de diferentes cargas en el movimiento de las partículas abrasivas y cómo esto rige los patrones de desgaste [9].

En otro trabajo se desarrolló una máquina siguiendo el principio de abrasión por rueda de caucho, pero se agregó un flujo de agua. Se estudiaron los efectos de esta modificación en los patrones y tasas de desgaste [10].

La importancia de este trabajo radica en la necesidad de contar con una máquina para ensayos de abrasión en instituciones y centros de investigación, con la finalidad de estudiar los mecanismos de desgaste presentes en los diferentes mecanismos y así brindar una solución que disminuya los efectos negativos del fenómeno, generando un impacto positivo tanto en la industria como en el área de investigación y desarrollo tecnológico.

Otro punto importante es que con el desarrollo propio de la máquina se busca disminuir considerablemente el costo de esta, se realizaron cotizaciones directamente con los proveedores de este tipo de máquinas para ensayos y su precio ronda los 50,000 dólares.

El objetivo de este artículo es presentar la metodología usada para el desarrollo de una máquina de ensayos de abrasión por medio de rueda de caucho. La metodología utilizada fue la propuesta por el autor Nigel Cross en su libro titulado "Métodos de diseño" [11], se desarrolla cada punto de la metodología con el fin de llegar a un diseño conceptual, para su posterior implementación en el diseño a detalle, cuidando que se cumplan los lineamientos de la norma ASTM G65 y los requerimientos de diseño.

2. Metodología

La principal razón de utilizar un método de diseño es sistematizar y seguir un método lógico que ayude a generar soluciones a los problemas presentes en el proceso de diseño. La metodología que se usará para el desarrollo de la máquina de ensayos de abrasión se compone de 6 etapas.

2.1. Clarificación de objetivos

Se deben especificar los principales objetivos que debe cumplir el diseño, al igual que los objetivos secundarios, estableciendo la relación entre ellos como se muestra en la figura 1. El objetivo principal es realizar y completar satisfactoriamente un ensayo de abrasión bajo la norma ASTM G65 [12].

2.2. Establecimiento de funciones

Aplicando la técnica de la caja negra (figura 2), se representa como entrada la necesidad de realizar el

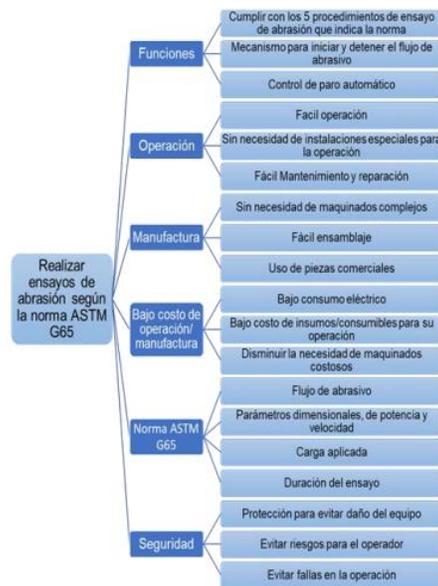


Figura 1. Árbol de objetivos.



Figura 2. Caja negra.

estudio de abrasión a un material y se colocan las principales entradas necesarias para que esto suceda, a la salida se encuentra lo que se espera del diseño, que para este caso en específico es lograr satisfactoriamente un ensayo de abrasión bajo la norma ASTM G65, por lo que en la salida se espera tener la probeta con desgaste y los residuos propios de la prueba.

En la figura 3, se muestran las funciones secundarias del proceso y las relaciones entre las entradas y salidas. La máquina debe contar con un sistema de sujeción para la probeta. Después se aplica la carga sobre la palanca que sostiene la porta probeta, utilizando contrapesos, con el fin de ejercer una presión de contacto entre la rueda de caucho y la probeta. Se inicia el movimiento rotacional de la rueda y al mismo tiempo se hace pasar la partícula abrasiva entre ambos materiales.

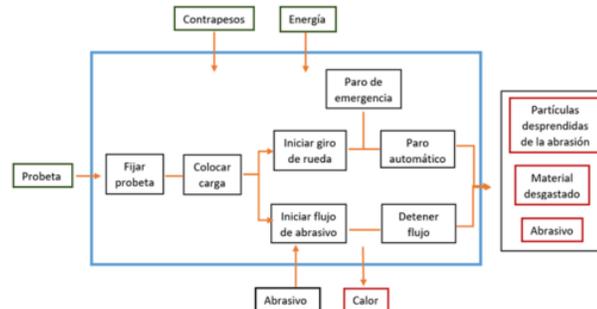


Figura 3. Caja transparente.

Se cuenta con un botón de paro de emergencia para detener el movimiento de la rueda. De igual manera se tiene un sistema de paro automático que detiene la prueba al alcanzar la distancia de abrasión programada.

2.3. Fijación de requerimientos

Es importante establecer las especificaciones que requiere el diseño de la máquina para asegurar que cumpla su función y los objetivos esperados. Existen requerimientos que necesariamente se tienen que cumplir, indicados con la letra (R), y otros que se desea cumplir u obtener valores cercanos al propuesto, indicados con la letra (D) como se muestra en la tabla 1.

2.4. Determinación de Características.

Para este apartado se utiliza el método del “despliegue de la función de calidad (QFD)”, el cual tiene como finalidad traducir los requerimientos que busca el cliente en características de ingeniería, que sirvan para el desarrollo conceptual y a detalle del prototipo de la máquina. De este método se obtiene como resultado la matriz llamada “Casa de la calidad”, ver figura 4. Se observa la relación entre los atributos deseables y las características de ingeniería que se esperan del diseño, con esto se establecen las metas que debe alcanzar el diseño para cumplir los requerimientos propuestos.

2.5. Generación de alternativas

Con ayuda de un diagrama morfológico (Tabla 2) se presentan las posibles alternativas de solución para diferentes subfunciones que tendrá el diseño final, algunos ejemplos de estos planteamientos son; la manera en la que será sujeta la probeta para su estudio, ya sea por medio de un sistema de mordazas accionadas mecánicamente o que este mismo sistema sea accionado hidráulicamente, y una última alternativa sería utilizar una abrazadera. Otro listado de alternativas es el medio por el cual se va a transmitir la potencia a la rueda, una opción es por medio de un sistema de banda-polea, la segunda opción es con un sistema de piñón-cadena y la última con una flecha.

Tabla 1. Fijación de requerimientos.

R / D	Requerimientos
	Características de motor de acuerdo a la norma
R	-Potencia: 1hp
D	-Reducción de RPM: 10/1
D	-Velocidad de 200 (±10) Rpm.
R	-1 solo sentido de giro.
	Características de operación
R	-Cumplir los 5 procedimientos que indica la norma.
D	-Fácil mantenimiento, sin necesidad de desarmar el equipo.
D	-Fácil reparación, que sea fácil de desarmar y cambiar componentes.
R	-Fácil operación, con procedimientos sencillos y apegados a la norma.
R	-Funcionamiento con energía eléctrica trifásica.
R	-Paro automático al finalizar la prueba.
	Manufactura
R	-Uso de piezas comerciales.
D	-Maquinados sencillos en torno y fresadora.
R	-Un ensamblaje sencillo para que se pueda montar y desmontar y así facilitar el transporte.
R	-Bajo costo de producción, uso de materiales de fácil adquisición.
	Seguridad
R	-Evitar daño al dispositivo, debe contar con un paro de emergencia.
R	-El diseño debe contar con guardas y lo necesario para garantizar la seguridad del operador.
	Parámetros de acuerdo a la Norma ASTM G65
R	-Dimensiones de la rueda de acero: 21.5 mm de diámetro. 12.7 mm de espesor.
R	-Espesor del vulcanizado de caucho: 12.7 mm.
R	-Dureza de caucho: A58-A62
R	-Flujo de abrasivo: 300 a 400 gr/min.
R	-Dimensiones del soporte de la probeta: 1" x 3" x .12"-.5"
R	-Transmitir la carga de 130 y 45 Newton (según el procedimiento) a la probeta.
	Dimensiones, estética y peso
D	-Altura: 1.5 m.
D	-Ancho: 1 m.
D	-Largo: 1.5 m.
R	-Peso: Para el peso se debe considerar uno de tal manera que permita su traslado y manipulación.
D	-Estética: Sin bordes en forma afilada, distribución uniforme de los diferentes elementos.

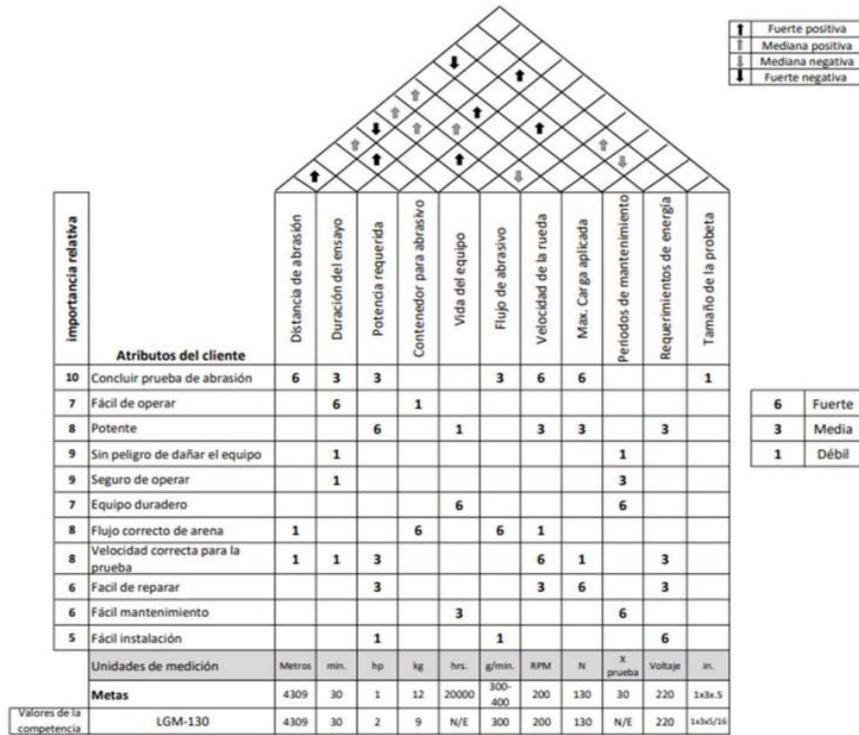


Figura 4. Casa de la calidad.

Tabla 2. Generación de alternativas

Generación de alternativas			
Sub-funciones	1	2	3
Mecanismo para sujetar probeta	Mordazas mecánicas 	Mordazas hidráulicas 	Abrazadera
Método para Colocar la carga (contrapesos) en la palanca.	Por encima de la palanca 	Contrapesos colgantes 	Resorte
Medio de transmisión de potencia	Polea-Banda 	Piñón-Cadena 	Flecha

Mecanismo para iniciar/detener el flujo de abrasivo	Llave de paso 	Compuerta 	Tapón roscado
Método para finalizar la prueba	Paro manual 	Paro automático con timer 	Paro automático con PLC
Método para paro de emergencia	Automático 	Manual 	Ambos

Tabla 3. Evaluación de alternativas

Sujeta probeta			Mordazas mecánicas			Mordazas hidráulicas			Abrazadera		
Objetivo	Peso	Parámetro	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor	Magnitud	Cal.	Valor
Sujeción firme	.5	Fuerza de agarre	Buena	5	2.5	Buena	5	2.5	Mediana	3	1.5
Fácil operación	.2	Sencillo de accionar	Medianamente fácil	3	.6	Muy Fácil	5	1	Difícil	1	.2
Bajo costo	.3	\$ (aprox.)	600	4	1.2	4000	1	.3	200	5	1.5
Suma					4.3				3.8	3.2	

2.6. Evaluación de alternativas

Las alternativas generadas en el apartado anterior deben ser evaluadas, esto es con la finalidad de seleccionar la opción más viable en función del peso de los objetivos, el cual se asignó comparándolos en base a su importancia. En la tabla 3 se muestra un ejemplo donde se comparan las alternativas en base a su rendimiento contra los objetivos ponderados, y así obtener un resultado numérico para cada una.

La opción que obtenga el mayor puntaje es la elegida. Esta misma metodología se repite para las alternativas de las 5 subfunciones restantes presentadas en el apartado 2.5.

3. Resultados

A partir de las soluciones obtenidas en el apartado 2.6 de la metodología de diseño, se obtiene el resumen en la tabla 4, en donde se muestran las opciones que mejor se adaptan a los objetivos planteados, con esto se puede comenzar a generar los primeros bosquejos o diseños conceptuales de lo que será el diseño final.

Tabla 4. Alternativas seleccionadas

Sub-función	Alternativa ganadora
Sujeta probeta	Mordazas mecánicas
Colocar la carga	Contrapesos colgantes
Transmisión de potencia	Flecha
Iniciar/detener el flujo de abrasivo	Llave de paso
Método para finalizar la prueba	Paro automático con timer
Paro de emergencia	Manual

3.1. Diseño conceptual

El primer diseño conceptual generado es el conjunto de transmisión de potencia. La principal función de este módulo es proporcionar las revoluciones y fuerza necesaria a la rueda de caucho para generar la abrasión en la probeta. Un diseño conceptual inicial se muestra en

la figura 5, que después de un análisis y refinamiento se obtiene el diseño conceptual final, que como se observa en la figura 6 y 7 se compone de un motorreductor conectado a la flecha por medio de un acople flexible, la flecha es soportada por dos chumaceras, y en el extremo de la flecha se encuentra la rueda de acero, con el vulcanizado de caucho en el perímetro.

El motorreductor seleccionado, es de 1hp con una velocidad de salida de 180 RPM, si bien la norma [12] indica que la velocidad de salida debe de ser de 200+/-10 RPM, comercialmente es complicado encontrar un motorreductor de estas características, por lo que se seleccionó el más cercano, que es el de 180 RPM. El número de revoluciones se encuentra en función de la distancia de abrasión generada durante el ensayo, porque al modificar este valor también se altera la duración de la prueba, pero sin afectar los resultados del ensayo.

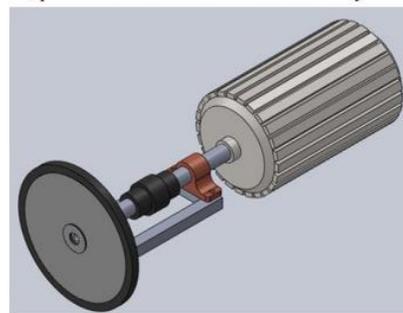


Figura 5. Diseño inicial del sistema de transmisión.

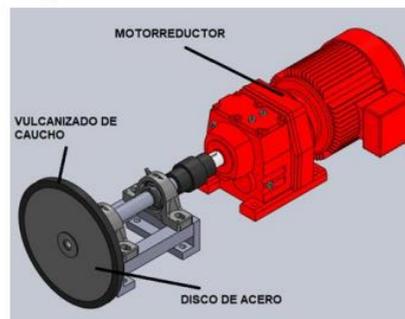


Figura 6. Sistema de transmisión, vista 1.

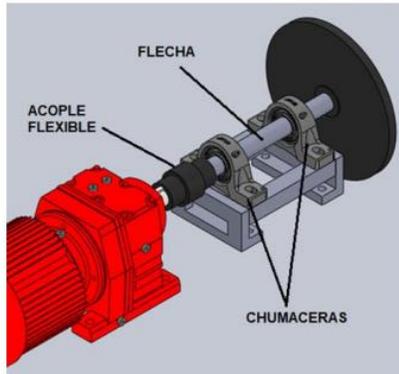


Figura 7. Sistema de transmisión, vista 2.

En la figura 8 se muestra el diseño conceptual del sistema para transmitir la carga a la probeta, se compone de la porta probeta con su sistema de mordazas mecánicas que se seleccionó anteriormente, también de una palanca donde en un extremo se fijará la porta probeta, y en el otro los contrapesos necesarios para proporcionar la carga. En la figura 9 se puede apreciar el diseño conceptual final.

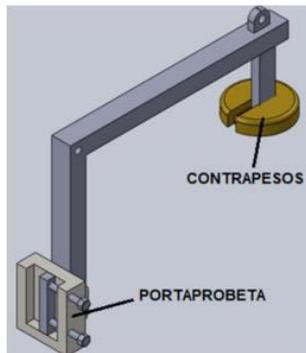


Figura 8. Diseño inicial de la palanca.



Figura 9. Diseño conceptual final de la palanca.

Se generó el primer diseño conceptual de la máquina el cual se muestra en la figura 10. Se observa la disposición de los diferentes elementos como lo es la tolva para contener el abrasivo, con el sistema de apertura y cierre ya seleccionado, también se encuentra el sistema de transmisión de potencia mostrado en la figura 5 y el mecanismo de palanca y porta probeta de la figura 8. De igual manera se indica la ubicación del sistema de control, donde se va a programar el paro automático del motor al finalizar la prueba, y adicionalmente un paro de emergencia.

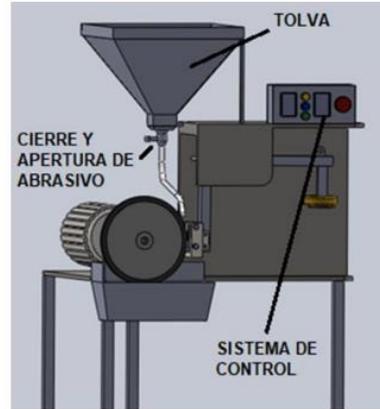


Figura 10. Máquina de abrasión.

En un diseño conceptual final (figura 11) se puede observar el motorreductor (1), que proporciona la rotación al disco de acero recubierto de caucho (2) por medio de la flecha (3). Se colocan los pesos (4) necesarios en la palanca (5) para aplicar la carga entre la probeta (6) y el disco (2). El abrasivo se coloca en la tolva superior (7) y se deja pasar hacia la boquilla (8) por medio de una manguera (9) que en su inicio tiene una llave de apertura y cierre (10). Para iniciar y detener la prueba se cuenta con un sistema de control y un paro de emergencia (11). En la tolva inferior (12) se recolecta el abrasivo usado y los mismos residuos del proceso de abrasión. Todos los elementos se encuentran soportados por una estructura metálica (13).

3.2. Diseño a detalle

Para un mejor análisis en el diseño a detalle, la máquina es dividida en 6 módulos:

- Transmisión de potencia
- Transmisión de carga
- Estructura
- Porta probeta
- Control
- Tolvas

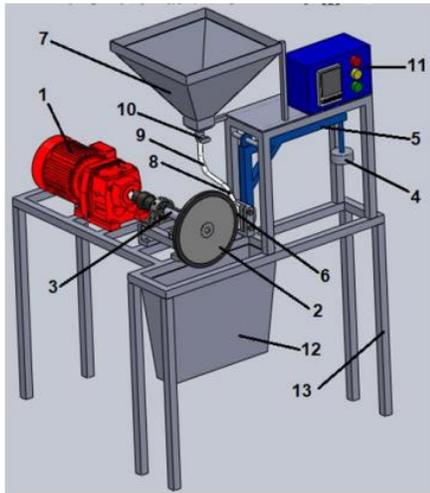


Figura 11. Diseño conceptual final.

3.3 Análisis de esfuerzos y deformaciones

A continuación, se presentan algunos de los análisis realizados empleando el software ANSYS®, los cuales ayudarán en una etapa más avanzada del diseño para saber cuáles son los elementos críticos y prestarles mayor atención.

Estructura

El primer análisis es el de la estructura. Las cargas que se toman en cuenta se muestran en la figura 12, que son las reacciones en el perno que soporta la palanca de transmisión de carga, las reacciones en las chumaceras del eje, que son generadas por la fuerza de contacto entre la probeta y la rueda de caucho y la fuerza de fricción, de igual manera se considera el peso del motorreductor. Se consideran las reacciones en las patas y en el análisis son consideradas como un soporte fijo. Para el material de la estructura se consideran las propiedades del aluminio.

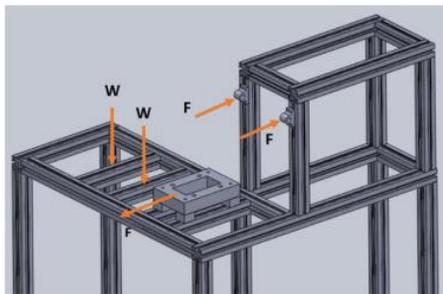


Figura 12. Fuerzas y reacciones presentes en la estructura.

En la figura 13 se observa que el valor de la deformación máxima es de .1196 mm. Este es un valor aceptable si se compara con el tamaño de la estructura. Para la geometría y dimensiones propuestas el esfuerzo a la fluencia no se ve excedido, dado que para el aluminio 6063 T5 el valor máximo que soporta es de 260 MPa [13] y como se muestra en la figura 14, el valor más grande que alcanza es de 9.22 MPa.

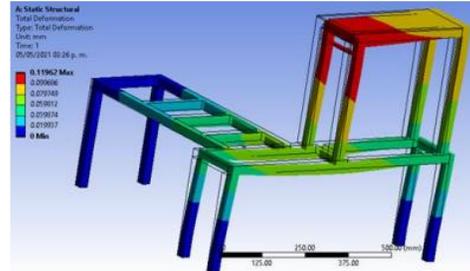


Figura 13. Deformación de la estructura.

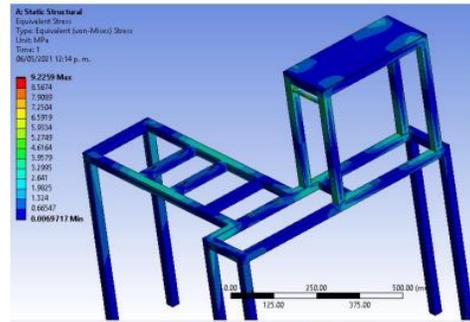


Figura 14. Esfuerzos en la estructura.

Perno

Dentro del mismo módulo de la estructura se realiza un análisis del perno, dado que es uno de los elementos que presenta mayor concentración de esfuerzos. Para este análisis se colocan las fuerzas presentes en el área de contacto con la palanca, y basado en el diseño conceptual, se considera una sección circular de 14 mm de acero *cold rolled* AISI 1018. En la figura 15 se observa la zona con mayor deformación, con un valor de .005 mm, este valor no tiene incidencia en el funcionamiento de la máquina.

En la figura 16 se presenta la zona de mayor concentración de esfuerzos, siendo el valor de esfuerzo máximo igual a 32.2 MPa. Este valor no pone en riesgo la resistencia del material dado que la resistencia a la fluencia para el acero AISI 1018 CD es de 270 MPa [14], dando como resultado un factor de seguridad de 8. Para el diseño de este elemento se considera correcto un factor de seguridad mayor a 2.

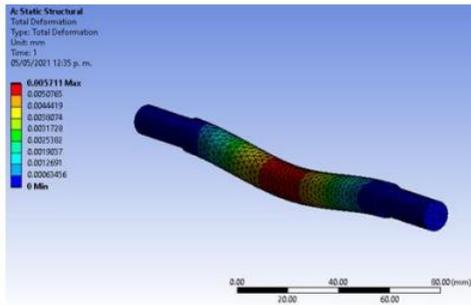


Figura 15. Deformación del perno.

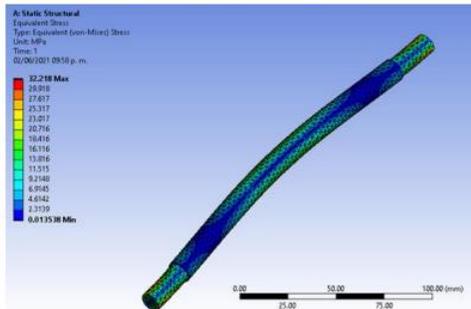


Figura 16. Esfuerzos en el perno.

Palanca

En el módulo de transmisión de carga se encuentra la palanca que soporta los contrapesos y la porta probeta, se realiza un análisis de este elemento, tomando en cuenta el peso de los contrapesos, así como su reacción en la probeta y la fuerza de fricción presente por el contacto con la rueda de caucho y la probeta, como se muestra en la figura 17, el material que se propone es un perfil de PTR A36 grado B de 1.5x1.5 pulgada, el cual tiene una resistencia a la fluencia de 250 MPa [15].

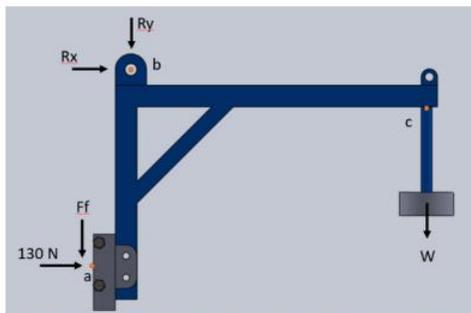


Figura 17. Fuerzas y reacciones presentes en la palanca.

Como se observa en la figura 18, la mayor deformación se encuentra presente en el extremo donde se colocan los contrapesos, se realizará un análisis para determinar si es necesario modificar el elemento de apoyo.

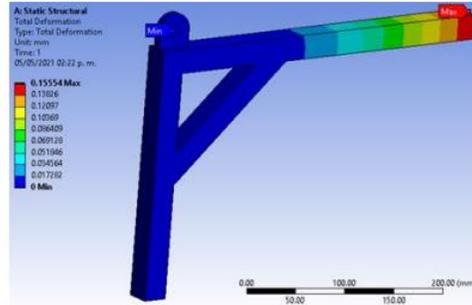


Figura 18. Deformación de la palanca de transmisión de carga.

En la figura 19 se muestra el análisis de esfuerzos, y como es de esperarse la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en el barreno, por donde pasa el perno y en las inmediaciones del elemento de apoyo, sin embargo, el valor máximo del esfuerzo es de 52.38 MPa, el cual no compromete la resistencia del elemento. Al compararlo con la resistencia a la fluencia obtenemos un factor de seguridad de 5.

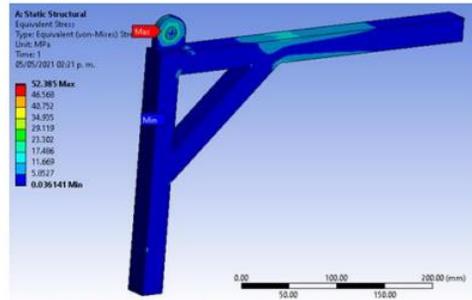


Figura 19. Esfuerzos en la palanca de transmisión de carga.

4. Conclusión

- Con ayuda de la metodología de Nigel Cross se logró obtener un diseño conceptual, en el que se determinaron las variables de diseño y alternativas de solución, así como las demandas impuestas por la norma ASTM G65, priorizando la funcionalidad, fácil utilización y bajo costo para el diseño final de la máquina.
- A partir del diseño conceptual, se está en la posibilidad de iniciar el diseño a detalle, donde se

determinarán las dimensiones y geometrías específicas de cada elemento.

- En base al análisis por medio de software de diseño se puede obtener una vista general de los elementos críticos en cada ensamble, y así saber dónde enfocar los cálculos para asegurar la estabilidad del sistema.
- En cuestión a la selección del motorreductor se determina que uno con un valor cercano a las revoluciones indicadas por la norma ASTM-G65 puede ser adaptado, siempre y cuando se respete la distancia de abrasión necesaria para cada prueba de abrasión.

Agradecimientos

Se desea agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el recurso otorgado para realizar los estudios de posgrado en el Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca.

REFERENCIAS

- [1] J. Marulanda, A. Meneses y C. Estrada, "Construcción de una máquina para ensayo en desgaste abrasivo; según norma técnica ASTM G-65", *Scientia et Technica*, no. 41, pp. 373-378, mayo de 2009.
- [2] W. Quintero, J. Flórez y M. Sanabria, "Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65", *Scientia et Technica*, vol. 20, no. 3, pp. 217-224, septiembre de 2015.
- [3] J. Trinidad, J. Amengual y G. Caram, "Diseño de una Máquina Para Ensayos de Abrasión Seca & Abrasión Húmeda", in *Eleventh Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, agosto 2013
- [4] A. Delmonte y M. Nieto, "Automatización de máquina de ensayos de abrasión", *Repositorio institucional Universidad Nacional de Mar del Plata*, 2017
- [5] M. Murcia, "Rediseño e instrumentación del banco para medición de desgaste abrasivo bajo la norma ASTM G-65", *Universidad de Ibagué*, junio de 2019
- [6] R. Chotěborský and M. Linda, "Evaluation of friction force using a rubber wheel instrument", *Agronomy Research*, vol. 12, no. 1, pp. 247-254, 2014
- [7] R. Namdeo and S. Tiwari, "Development of rubber wheel abrasion testing machine for estimation of three body abrasive wear of automobile components", *International Journal on Design & Manufacturing Technologies*, vol. 9, no. 1, pp. 1-5, January 2015
- [8] A. Doering, D. Danks, S. Mahmoud and J. Scott, "Evaluation of ASTM G65 abrasive —Spanning 13 years of sand", *Wear*, vol 271, pp. 1252-1257, January 2011
- [9] S. Nahvi, P. Shipway and D. McCartney, "Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test", *Wear*, vol. 267, pp. 2083-2091, October 2009
- [10] S. Wirojanupatump and P. Shipway, "Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus", *Wear*, vol. 239, pp 91-10, April 2000
- [11] N. Cross, "Métodos de Diseño", Primera edición, México, Limusa, 2002
- [12] Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM, G 65 – 00, pp. 1-12, 2001
- [13] Moas Modular Aluminum System, "Perfil de aluminio ranurado 40", <https://moasperfiles.com.mx/PDF/Ficha%20t%C3%A9cnica%20Perfil%2040x40.pdf>
- [14] R. Budynas y J. Nisbett, "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley", Novena edición, México, Mc Graw Hill, 2011
- [15] F. Díaz Del Castillo, "Perfiles estructurales" UNAM, Departamento de ingeniería, México, enero 2019

Constancia de participación en la sesión de pósters del segundo seminario de posgrado, celebrado en el Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

LUIS ANTONIO MARTÍNEZ BUTRÓN

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN EN LA SESIÓN DE PÓSTERS DEL
2º SEMINARIO DE POSGRADO "EL ROL DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN LA SOLUCIÓN DE
LOS PROBLEMAS NACIONALES" REALIZADO LOS DÍAS 19 Y 20 DE MAYO DEL PRESENTE.

PACHUCA DE SOTO, HGO., A 20 DE MAYO 2022.



ING. FRANCISCO RAFAEL SALDAÑA IBARRA
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

