

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA CALOTEST PARA EVALUAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE SUPERFICIES DURAS.

Diseño Mecánico

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN LA
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA.**

GALINDO FRANCO BRAYAN JHAIR

brayan.galindo@epn.edu.ec

DIRECTOR: LUIS FERNANDO PANTOJA SUAREZ

fernando.pantoja@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, BRAYAN JHAIR GALINDO FRANCO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

BRAYAN JHAIR GALINDO FRANCO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por BRAYAN JHAIR GALINDO FRANCO, bajo mi supervisión.

LUIS FERNANDO PANTOJA SUAREZ

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

BRAYAN JHAIR GALINDO FRANCO

LUIS FERNANDO PANTOJA SUAREZ

DEDICATORIA

Este gran paso está dedicado específicamente a mi querida madre Luz Marina Franco que ha sido el pilar principal en toda mi vida, que con mucho esfuerzo y perseverancia me animaba a nunca darme por vencido y con sus sabias palabras me impulsaban cada día a terminar mis estudios y salir siempre adelante.

A mi hermano Andersson Fandiño, por ser tan paciente y ser uno de los sustentos económicos que me permitieron poder estudiar, espero poder retribuirte de la misma manera y apoyarte para que también logres culminar una carrera.

A mi hermana pequeña Gabriela López, que fue la inspiración que necesitaba.

AGRADECIMIENTO

Durante mi periodo por la carrera universitaria corrí con la suerte de ir conociendo personas tan amables, increíbles, que me ayudaron y me apoyaron en momentos en que daba todo por perdido y ayudarme a cumplir un propósito en mi vida.

De nuevo gracias a mi madre por ser tan fuerte y mantenerte con la frente en alto durante las difíciles situaciones y adversidades que se fueron presentando.

A mi hermano que invirtió su fe y su tiempo en mí, este no es solo mi logro sino de ambos.

A mi hermanita que espero que en un futuro siga mis pasos.

A mi familia los Galindo y los Fandiño, en Colombia, que me mandaron sus buenas vibras y deseos.

A mi tutor Fernando Pantoja que me tuvo bastante paciencia durante mi trabajo.

A mis amigos y hermanos de la carrera como Edison, Anthony, Kevin, Jorge, solo por mencionar algunos, que me ayudaron a crecer como persona y ver el verdadero valor de la amistad.

A doña Lucy por haberme apoyado en un sin número de encrucijadas que me pasaron, gracias por reservar un poco de su tiempo en resolver mis problemas.

A los técnicos como don Luis y don Rene de los laboratorios de mecánica, que me recibieron en sus instalaciones y me brindaron su apoyo y conocimiento.

A todos los demás que fueron parte de mi vida gracias al destino que se encargó de cruzarlos por mi camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificaciones.....	I
Declaración de autoría	II
Dedicatoria	III
Agradecimiento	IV
índice de contenido	V
índice de tablas	VIII
índice de figuras	XI
índice de ecuaciones.....	XIV
Resumen	XVI
Abstract	XVII
Descripción del componente desarrollado	1
1. Introducción	2
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivo general	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Alcance	3
1.5 Marco teórico.....	4
Antecedentes.....	4
Fundamentos teóricos	5
Desgaste abrasivo	5
Desgaste causado por micro abrasivo.	6
Abrasivos	7
Instrumento para la caracterización de superficies.	7
Ecuaciones requeridas para el ensayo por micro abrasión.....	12
1.6 Benchmarking	15
2. Metodología.....	18
2 1. Establecimiento de requisitos técnicos.....	20
Principios para tener en cuenta.....	20
Casa de la calidad.....	21
Especificaciones técnicas.....	23

2 2. Elección de posibles soluciones.....	24
Estructura funcional y modular para el diseño de un calotest.....	24
Planteamiento de alternativas.	26
Módulo 1.- almacenaje y control.	27
Opción para la solución del módulo 1	29
Módulo 2.- transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción.	29
Opciones para las soluciones del módulo 2.	33
Módulo 3.- fijación de motor.	36
Opciones para las soluciones del módulo 3	38
Módulo 4.- sujeción y movimientos de la muestra.....	39
Opciones para las soluciones del módulo 4	44
2 3. Revisión de posibles soluciones.....	46
Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del primer módulo. .	46
Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del segundo módulo.	46
Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del tercer módulo ...	47
Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del cuarto módulo ..	48
2 4. Matriz morfológica	49
2 5. Solución virtual.....	50
2 6. Diseño mecánico.....	50
2 7. Construcción del equipo calotest.....	64
3. Pruebas, resultados, conclusiones y recomendaciones	64
3.1. Pruebas	64
3.2. Resultados	66
3.3. Análisis de resultados.	72
3.4. Conclusiones.....	74
3.5. Recomendaciones.....	75
4. Referencias bibliográficas.....	76
5. Anexos 1	
Anexos i. Casa de la calidad	1
Anexos ii. Tablas de evaluación de alternativas para el módulo 2.	2
Anexos iii. Tablas de evaluación de alternativas para el módulo 3.....	4
Anexos iv. Tablas de evaluación de alternativas del módulo 4.....	5

Anexos v. Data sheet de motores de la serie 775	7
Anexos vi. Factores para el cálculo del eje.....	8
Anexos vii. Planos	11
Anexos viii. Hojas de procesos	12
Anexos ix. Hoja técnica medidor de espesores	13
Anexos x. Evidencias preoperacionales del equipo.....	14
Anexos xi. Fotografías de micro cráteres	15
Anexos xii. Manual de operación y mantenimiento.....	18
Anexos xiii. Informe de resultados del laboratorio de metalografía.	19

Índice de tablas

Tabla 1. Datos Técnicos Del Equipo De Calo Test Modelo Cat2c	16
Tabla 2. Datos Técnicos Del Modelo Kalo Max Nt li	16
Tabla 3. Datos Técnicos Del Modelo Kalo Max li.....	17
Tabla 4. Especificaciones Técnicas Del Dispositivo.....	23
Tabla 5. Características Del Circuito Arduino Uno.	27
Tabla 6. Características De La Caja De Almacenamiento.	28
Tabla 7. Alternativa Para El Módulo 1	29
Tabla 8. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 1 Del Módulo 1.....	29
Tabla 9. Características Del Motor Dc Con Encoder.....	30
Tabla 10. Características Del Motor Dc 775.....	30
Tabla 11. Características Del Eje Acanalado Para La Esfera Libre.	31
Tabla 12. Características Del Eje Acanalado Para La Esfera Fija.	32
Tabla 13. Alternativas Para El Módulo 2.	33
Tabla 14. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 1 Para El Módulo 2.....	33
Tabla 15. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 2 Del Módulo 2.	34
Tabla 16. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 3 Del Módulo 2.	34
Tabla 17. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 4 Del Módulo 2.	35
Tabla 18. Características De La Base Para El Motor Fija Con Acanalado.....	36
Tabla 19. Características De La Base Para El Motor Con Sujeción Articulada.	37
Tabla 20. Características De La Base Del Equipo.	37
Tabla 21. Alternativas Para El Módulo 3	38
Tabla 22. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 1 Del Módulo 3.....	38
Tabla 23. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 2 Del Módulo 3.....	39
Tabla 24. Características De La Mordaza Acanalada Para La Guía.	40
Tabla 25. Características Para La Mordaza Con Ejes Guías.	40
Tabla 26. Características De La Base Inclinable Para La Mordaza.	41
Tabla 27. Características Del Base Con Acanalado En Forma De T.	42

Tabla 28. Características Del Base Con Cola De Milano.....	43
Tabla 29. Alternativas De Solución Para El Módulo 4.....	44
Tabla 30. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 1 Del Módulo 4.....	44
Tabla 31. Ventajas Y Desventajas De La Alternativa 2 Del Modelo 4.....	45
Tabla 32. Valores De Residuos Ponderados	46
Tabla 33. Conclusión Para Las Alternativas Del Módulo 2.....	47
Tabla 34. Conclusión Para Las Alternativas Del Módulo 3.....	48
Tabla 35. Conclusión Para Las Alternativas Del Módulo 4.....	48
Tabla 36. Matriz Morfológica Del Calo Test.	49
Tabla 37. Cálculo Para La Potencia Del Motor Requerido Para Una Esfera De 1 Pulgada De Diámetro	53
Tabla 38. Dimensiones De Los Canales Para Cada Esfera.....	54
Tabla 39. Propiedades Mecánicas Y Físicas Del Aisi 1018	57
Tabla 40. Diagrama Cortante Y Flector En El Plano Yz.....	57
Tabla 41. Parámetros Para El Cálculo Del Diámetro Del Eje.....	59
Tabla 42. Ajuste Para El Rodamiento	59
Tabla 43. Pesos De Los Componentes (Prensa Y Motor).....	61
Tabla 44. Propiedades Mecánicas Del Acero A36	61
Tabla 45. Propiedades Del Duralón [.	63
Tabla 46. Parámetros Para Generación De Micro Cráteres En Recubrimiento De Cromado	66
Tabla 47. Espesores En Las Muestras A Y B Con El Equipo Insize	67
Tabla 48. Espesor De La Muestra A Con El Equipo Calotest.	67
Tabla 49. Espesor De La Muestra B Con El Equipo Calotest	68
Tabla 50. Espesores En Las Muestras A Y B Con El Equipo Elcometer	68
Tabla 51. Error De La Media De La Muestra A Comparada Entre Los Equipos. .	71
Tabla 52. Error De La Media De La Muestra B Comparada Entre Los Equipos. .	71
Tabla 53. Datos Para El Cálculo	71
Tabla 54. Volumen Y Tasa De Desgaste De La Muestra A	72

Tabla 55. Volumen Y Tasa De Desgaste De La Muestra B	72
Tabla 56. Evaluación Del Peso Específico De Los Criterios Del Módulo 2.	2
Tabla 57. Evaluación De Las Rpm Para El Módulo 2	2
Tabla 58. Evaluación De La Fuerza De Fricción Para El Módulo 2.....	2
Tabla 59. Evaluación De La Facilidad De Fabricación Para El Módulo 2	3
Tabla 60. Evaluación Del Mantenimiento Para El Módulo 2.....	3
Tabla 61. Evaluación Del Peso Específico De Los Criterios Del Módulo 3.	4
Tabla 62. Evaluación Del Desplazamiento Del Módulo 3.....	4
Tabla 63. Evaluación Del Peso Del Módulo 3.	4
Tabla 64. Evaluación Del Mantenimiento Del Módulo 3.	4
Tabla 65. Evaluación Del Peso Específico De Los Criterios Del Módulo 4	5
Tabla 66. Evaluación De Movilidad Para El Módulo 4.....	5
Tabla 67. Evaluación De Facilidad De Fabricación Para El Módulo 4	5
Tabla 68. Evaluación Del Peso Para El Módulo 4.....	5
Tabla 69. Evaluación Del Mantenimiento Para El Módulo 4.....	6

Índice de figuras

Figura 1.	Diagrama de países con mayor número de investigaciones sobre caracterización de superficies.	4
figura 2.	Diagrama de las palabras claves para la caracterización	5
figura 3.	Desgaste micro abrasivo de dos cuerpos.....	6
figura 4.	Desgaste micro abrasivo por tres cuerpos	6
figura 5.	Esquema del equipo de ensayo según la norma astm g-65	8
figura 6.	Método de desgaste abrasivo por medio de rayadura	9
figura 7.	Diseño de calo tester kt1	10
figura 8.	Micrografía de micro cráteres.....	10
figura 9.	Principio de funcionamiento de esfera fija.....	11
figura 10.	Desbaste por micro abrasión con esfera libre apoyada sobre un eje. 12	
figura 11.	Distancias del cráter generado en el sustrato.	13
figura 12.	Modelo cat2c	16
figura 13.	Modelo kalo max nt ii	16
figura 14.	Modelo kalo max ii	17
figura 15.	Etapas de procesos de diseño-metodología	20
figura 16.	Diagrama de la función global del equipo	25
figura 17.	Diagrama de la subfunción 1	25
figura 18.	Diagrama de subfunción 2	26
figura 19.	Diagrama modular de la subfunción 2	26
figura 20.	Circuito de control de rpm para un motor con arduino uno	28
figura 21.	Base de acrílico.....	28
figura 22.	Alternativa 1 del módulo 1.....	29
figura 23.	Motor dc con encoder	30
figura 24.	Motor dc 775	31
figura 25.	Eje acanalado para esfera libre.....	32
figura 26.	Eje con esfera fija.....	33

figura 27.	Alternativa 1 módulo 2.....	34
figura 28.	Alternativa 2 módulo 2.....	34
figura 29.	Alternativa 3 módulo 2.....	35
figura 30.	Alternativa 4 módulo 2.....	35
figura 31.	Base de motor fija con acanalado	36
figura 32.	Base de motor de sujeción articulada	37
figura 33.	Base de sujeción.	38
figura 34.	Alternativa 1 módulo 3.....	39
figura 35.	Alternativa 2 módulo 3.....	39
figura 36.	Mordaza acanalada para la guía.	40
figura 37.	Mordaza con ejes guías	41
figura 38.	Base inclinable para la mordaza	42
figura 39.	Base con acanalado en forma de t.....	43
figura 40.	Base cola de milano	43
figura 41.	Alternativa 1 módulo 4.....	44
figura 42.	Alternativa 2 módulo 4.....	45
figura 43.	Alternativa seleccionada para el módulo 1	46
figura 44.	Alternativa seleccionada para el módulo 2	47
figura 45.	Alternativa seleccionada para el módulo 3.	48
figura 46.	Alternativa seleccionada para el módulo 4	49
figura 47.	Solución virtual del calo test propuesto.....	50
figura 48.	Esquema de transmisión de movimiento de rotación	51
figura 49.	Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas entre la esfera y el eje ..	52
figura 50.	Diagrama de diámetro de contacto de la esfera con los bordes del eje.	52
figura 51.	Dimensiones del canal de la esfera de 20 mm.....	54
figura 52.	Modificación al canal.....	55
figura 53.	Esquema del soporte y cargas en el eje.....	55
figura 54.	Simulación del eje del motor;.....	60

figura 55.	Simulación de la base del equipo	61
figura 56.	Ubicación del de ajuste rápido	62
figura 57.	Simulación del eje de ajuste rápido	62
figura 58.	Simulación de la base de movimiento transversal.....	63
figura 59.	Ubicación de los puntos a ensayar.....	65
figura 60.	Pruebas de operación.	66
figura 61.	Cráter generado por el equipo calotest	67
figura 62.	Gráfica de frecuencia de la muestra a en el equipo calotest	69
figura 63.	Gráfica de frecuencia de la muestra b en el equipo calotest	69
figura 64.	Gráfica de frecuencia de la muestra a en el equipo elcometer	69
figura 65.	Gráfica de frecuencia de la muestra b en el equipo elcometer	70
figura 66.	Gráfica de frecuencia de la muestra a en el equipo insize	70
figura 67.	Gráfica de frecuencia de la muestra b en el equipo insize	70
figura 68.	Medidas de tendencia central entre las muestras ay b con los distintos métodos de medición de espesores.....	71
figura 69.	Casa de calidad.....	1
figura 70.	Data sheet del motor requerido	7
figura 71.	Factor superficial	8
figura 72.	Factor de tamaño	8
figura 73.	Factor de carga	8
figura 74.	Factor de temperatura	8
figura 75.	Factor de confiabilidad	9
figura 76.	Especificaciones técnicas del rodamiento	9
figura 77.	Ajustes recomendados	10
figura 78.	Medidor insize	13
figura 79.	Medidor elcometer	13

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.	Espesor de la película.....	13
Ecuación 2.	Profundidad total de penetración en la muestra.....	13
Ecuación 3.	Profundidad de penetración en el sustrato.....	13
Ecuación 4.	Espesor de la película en función de los diámetros de los cráteres y el radio de la esfera.....	14
Ecuación 5.	Espesor del recubrimiento en placas.....	14
Ecuación 6.	Velocidad lineal.....	14
Ecuación 7.	Distancia de deslizamiento.....	14
Ecuación 8.	Volumen de desgaste.....	14
Ecuación 9.	Tasa de desgaste.....	14
Ecuación 10.	Carga normal en la muestra.....	14
Ecuación 11.	Tasa de desgaste específica.....	15
Ecuación 12.	Volumen de la esfera.....	51
Ecuación 13.	Masa de la esfera.....	51
Ecuación 14.	Peso de la esfera.....	51
Ecuación 15.	Fuerza normal en el eje y'.....	51
Ecuación 16.	Fuerza rozamiento en la muestra.....	51
Ecuación 17.	Componente del peso de la esfera en el eje x'.....	52
Ecuación 18.	Fuerza normal de contacto entre la esfera y el eje.....	52
Ecuación 19.	Fuerza de contacto entre el eje y la esfera.....	52
Ecuación 20.	Velocidad tangencial al punto de contacto.....	52
Ecuación 21.	Distancia de contacto de la esfera con los bordes del canal del eje	52
Ecuación 22.	Potencia de contacto entre las superficies.....	53
Ecuación 23.	Potencia del motor.....	53
Ecuación 24.	Altura del canal.....	54
Ecuación 25.	Diámetro para elementos sometidos a fatiga a criterio de asme	56
Ecuación 26.	Límite de resistencia a la fatiga modificado.....	56

Ecuación 27.	Factor debido a condiciones superficiales	56
---------------------	---	----

RESUMEN

Con la intención de equipar en el laboratorio de materiales con un instrumento que logre caracterizar los espesores de recubrimientos duros y poder evaluar su resistencia al desgaste, se construyó el equipo Calotest.

El funcionamiento de este equipo consiste en hacer girar una esfera de acero sobre una muestra a elevadas revoluciones, se genera una fricción relativa entre las partes debido a la rugosidad que presentan los materiales, al haber un único punto de contacto entre ambas superficies se produce una micro abrasión que tiene una forma de dos círculos concéntricos para muestras planas y óvalos concéntricos para muestras cilíndricas o esféricas.

Por medio de un análisis geométrico se deduce que hay una relación directa entre el espesor del recubrimiento y las distancias de estos círculos u óvalos concéntricos. la primera distancia es la que se mide desde un punto del diámetro externo del cráter de la superficie hasta el otro extremo del cráter interno del material base, la segunda medida es el ancho que hay entre los dos círculos, al multiplicar estos dos valores y dividirlos para el diámetro de la esfera, se encuentra de manera fácil el espesor de la capa del sustrato, además, el con el diámetro interno en el material base y la distancia de deslizamiento que hizo la esfera en la muestra se puede calcular al volumen de desbastado.

Se comprobó el funcionamiento del equipo con dos ejes de acero cromados y se validó su espesor usando equipos de ultrasonido, encontrando que el error en la medición es menor al 25%.

PALABRAS CLAVE: Calotest, micro cráter, desgaste abrasivo, espesor del recubrimiento.

ABSTRACT

To equip the material's laboratory with an instrument that can characterize the thickness of hard coatings and evaluate their resistance to wear, the device called "Calotest" was built.

The operation of this equipment consists of rotating a steel sphere over a sample at high revolutions, a relative friction is generated between the parts due to the roughness of the materials, and as there is a single point of contact between both surfaces, a micro abrasion is produced, which has a shape of two concentric circles for flat samples and concentric ovals for cylindrical or spherical samples.

By means of a geometric analysis it is deduced that there is a direct relationship between the thickness of the coating and the distances of these concentric circles or ovals. The first distance is the one measured from one point of the external diameter of the surface crater to the other end of the internal crater of the base material, the second measurement is the width between the two circles, The diameter of the sphere is multiplied by these two values, and their division yields the thickness of the substrate layer., in addition, the with the internal diameter in the substrate and the sliding distance that made the sphere in the sample can be calculated to the roughing volume.

The performance of the equipment was tested with two chrome-plated steel shafts and its thickness was validated using ultrasound equipment, finding that the measurement error is less than 25%.

KEYWORDS: Calotest, micro cratering, abrasive wear, coating thickness.

DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Mediante este apartado se busca diseñar y construir los componentes de la estructura y sujeción para el dispositivo "Calotest" el cual sirve para estimar la resistencia al desgaste de materiales sólidos y el espesor de superficies duras. Para ello, este componente se centrará en las siguientes tres fases, diseño, selección de material y ensamble.

Diseño

Para la fase de diseño dividió en tres subcomponentes de estudio, el primero la fijación de las muestras, en este caso se diseñará una prensa sujetadora de muestras, la cual debe cumplir con tres condiciones de trabajo, un desplazamiento transversal al eje de rotación, un movimiento angular que permita ensayar la muestra en distintas posiciones angulares de estudio, y finalmente la sujeción por parte de la mordaza.

El segundo caso de estudio se centrará en el armazón o cuerpo que, contendrá en su interior el sistema electrónico de control del equipo, por medio de una evaluación y selección alternativas, para este módulo se examinará lo práctico de escoger este armazón como base de la prensa y demás subcomponentes o un sistema lateral que se conecte al motor-eje.

Por último, se diseñará el cuerpo del eje, el cual permita el trabajo de rotación de las esferas, para esto se calculará el dimensionamiento del acanalado que servirá como base de contacto para transmitir la velocidad angular a la esfera, este dimensionamiento determinará si será necesario hacer uno para las tres esferas (15, 20, 25.4) mm o se deberá realizar un segundo acanalado para la esfera más pequeña.

Selección del material.

Para este apartado se debe tener en cuenta la funcionalidad de cada caso analizado anteriormente. Para la prensa buscará un material que sea resistente, capaz de soportar los largos tiempos de operación y cargas a las que se vaya a someter, que sea anticorrosivo, debido a que se trabajará con fluidos y liviano, porque se necesita que el equipo se pueda transportar con facilidad.

De igual manera, el eje, debe ser de un material ligero, maquinable y anticorrosivo debido a que este también estará expuesto a un fluido.

Por otro lado, para la estructura del equipo electrónico que dependerá de las condiciones de trabajo, tanto en funcionalidad como en la estética, se tendrá en cuenta qué material será el más adecuado para este.

Ensamblaje

Finalmente, en esta fase se centrará en el tipo de ensamble que se requiera para cada uno de los tres casos, la prensa, el eje y la estructura del equipo electrónico, ya que se debe considerar si estos requieren un ensamble por tornillos, por sujeción con aditivos o por ensamble a presión y esto es, debido a que el cliente solicita un fácil desajuste para futuros mantenimientos preventivos y correctivos del dispositivo.

Tal como es previsto en los componentes de diseño de máquinas, este componente realizará un estudio que contemple los parámetros que se requieran para seleccionar, diseñar y construir la mejor alternativa, para esto incluirá un estudio de benchmarking para conocer cómo se cotiza este instrumento en los mercados nacionales e internacionales, una determinación de las especificaciones técnicas que debe poseer este instrumento a construir, partiendo de las condiciones del cliente y obteniendo las especificaciones técnicas más pertinentes a través de la casa de la calidad.

Luego, una selección de la mejor alternativa de diseño con ayuda de una matriz morfológica, la que se mostrará un resultado de la solución global con modelo 3D usando un programa CAD (Inventor), incluirá un análisis de esfuerzos que garantice el propósito de los elementos seleccionados. Contemplará los equipos y herramientas que se van a emplear para la construcción de los anteriores subcomponentes. Terminando con los diseños de ensamblaje del equipo y los correspondientes planos de subconjunto y taller del dispositivo CALOTEST.

1. INTRODUCCION

Con el fin de lograr cuantificar los recubrimientos de las superficies de los distintos elementos ingenieriles, la micro abrasión resulta ser una innovadora técnica, que por medio de un desgaste abrasivo de tres cuerpos (*muestra, esfera y liquido abrasivo*), permite calcular por medio de una ecuación la resistencia al desgaste que presenta la muestra ensayada, pero lo interesante de este procedimiento, es que además, se puede lograr determinar el espesor de la capa o múltiples capas que estén presentes en el recubrimiento ensayado. La característica más notable de este método es lo bien que funciona para evaluar superficies duras que tienen películas finas sobre ellas.

Debido a su conjunto de componentes accesibles, el equipo utilizado para estas pruebas resulta atractivo por su sencillez y facilidad de manejo, y los procesos necesarios para obtener las mediciones son rápidos y sin complicaciones.

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los tantos retos de la ingeniería de materiales es lograr alargar la vida útil de los distintos componentes ingenieriles, así como también, incrementar su eficiencia y rendimiento. Es por esto que en los últimos años los laboratorios han investigado sobre nuevas tecnologías para recubrimientos de las superficies y tratamientos térmicos, debido a que han concluido que es en la superficie donde se generan la mayoría de las fallas, tales como la corrosión, el desgaste, entre otras.

Es aquí donde se inicia la idea de crear un propio prototipo de instrumento de medición por medio de micro abrasión, para cuantificar los espesores de superficies de capa fina y resistencia al desgaste de muestras que lleguen al Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica o para trabajos futuros de tesis o investigaciones.

1.2 Objetivo general

Diseñar y construir los componentes del cuerpo y sujeción para el dispositivo “Calotest” el cual sirve para evaluar la resistencia de las superficies duras al desgaste y el espesor del recubrimiento.

1.3 Objetivos específicos

1. Establecer las especificaciones técnicas más sobresalientes del tipo de instrumento a construir.
2. Definir la solución global a las distintas alternativas por medio de la estructura funcional y modular del sistema de sujeción de la prensa, armazón y eje.
3. Realizar el plano de conjunto de la máquina implementando el diseño de materialización.
4. Proceder con las pruebas de funcionamiento.

1.4 Alcance

El alcance de este componente se va a centrar en el diseño y la construcción de todo el cuerpo estructural del equipo “Calotest”, esto significa, el proceso del diseño conceptual y terminar con el de materialización, para lo cual, una vez establecido los planos de los distintos modelos para cada subcomponente, se procederá a su fabricación usando las instalaciones, equipos y herramientas que goza en la universidad.

1.5 Marco teórico

Antecedentes

Para la investigación de documentos referentes al tema, se realizó un estudio bibliométrico usando el programa VOSviewer, en el cual se extrajo un aproximado de mil papers de la base de datos de SCOPUS, los cuales estaban relacionados con las palabras claves, tales como: micro abrasión, abrasión en superficies duras, recubrimientos metálicos y resistencia al desgaste, ver Figura 2. Con el fin de conocer el estado del arte respecto al equipo que se pretende diseñar. Referente al estudio de la caracterización de superficies existe una gran variedad de documentos que tratan acerca de este tema. Como se indica en la Figura 1 en varios países e instituciones. Se evidencia que existe una gran producción científica en este campo en países como China, India y E.E.U.U, siendo los que más han contribuido a investigaciones sobre la caracterización de superficies, salvo por algunos países americanos como México, Colombia y Brasil.

El diseño y desarrollo del equipo Calotest brinda la oportunidad de que futuros trabajos aborden el fascinante campo del estudio del desgaste abrasivo de materiales, ya que Ecuador no ha realizado aportes notables en esta área.

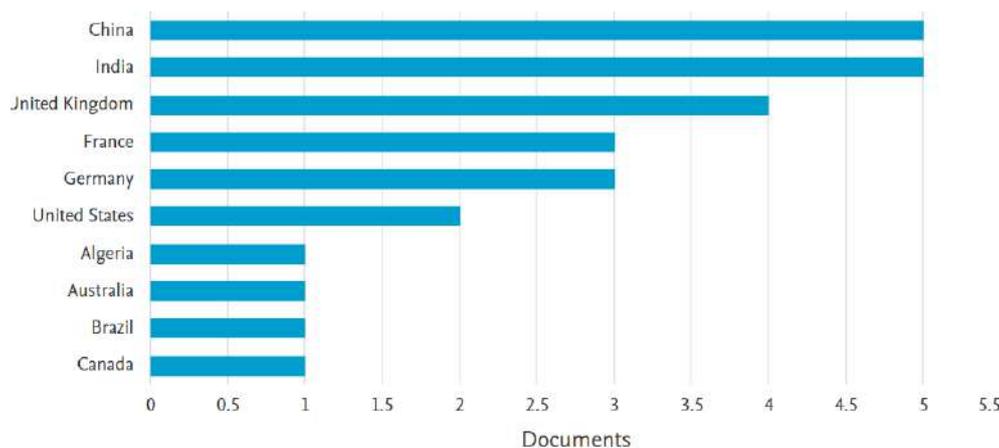


Figura 1. Diagrama de países con mayor número de investigaciones sobre caracterización de superficies[1].

Desgaste causado por Micro abrasivo.

Debido a que este es el efecto que se busca para lograr la caracterización de las distintas superficies a ensayar, se detallará minuciosamente los tipos de desgaste micro abrasivos que se pueden encontrar entre dos superficies en contacto. El desgaste micro abrasivo se divide esencialmente en dos categorías, de dos y tres cuerpos, brevemente el primero hace referencia al movimiento relativo que puede existir entre dos superficies de contacto, siendo un movimiento deslizante o reciprocante como se indica en Figura 3. En el cual la superficie que tenga mayor dureza tendrá un efecto de deformación plástica y separación de material en la superficie de menor dureza al estar sometidos bajo una acción de carga normal, debido a que entra en juego dos mecanismos conocidos como micro cortantes y micro arados [5].

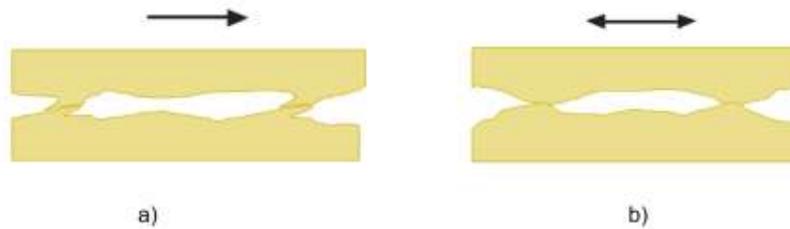


Figura 3. Desgaste micro abrasivo de dos cuerpos: a) movimientos deslizantes de una superficie. b) movimientos reciprocantes de dos superficies [6].

La segunda categoría se basa en introducir un tercer cuerpo, el cual básicamente puede ser un material endurecido y que se encuentre en el orden de los micrómetros, a estos se les denomina partículas abrasivas, cuya función es lograr el efecto de micro desgaste en la superficie de la probeta, el cual es ligeramente menos dura que las partículas, nombrando algunas partículas abrasivas como por ejemplo se tiene, pasta de diamante, carburo de boro, óxido de aluminio, etc. [5], este efecto de desgaste se aprecie en la Figura 4.

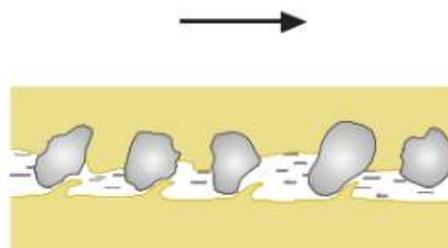


Figura 4. Desgaste micro abrasivo por tres cuerpos [6].

Abrasivos

Las partículas abrasivas son muy empleadas para cortar, desbastar y desgastar las superficies de diversos materiales, siempre que estos sean ligeramente más blandos que dichas partículas, poseen un elevado grado de tenacidad, lo cual evita su fractura en el proceso de desbaste, además debido al incremento de temperatura causado por la fricción durante el trabajo es necesario que las partículas posean refractividad [7].

Debido a la gran cantidad de que existe en los mercados y su diferencia en propiedades químicas y físicas, se las clasifica en dos grupos [5]:

- **Artificiales:** Creados por medio de reacciones químicas, las cuales son las más empleadas en distintos campos, en este grupo se tiene carburo de boro y silicio, polvo de diamante, aunque no son muy empleados debido a su alto costo, óxido de aluminio (Alúmina), entre otras.
- **Naturales:** propios en la naturaleza tales como el cuarzo, diamante, esmeril, corindón natural, arena sílica, granate, cal de Viena, por nombrar algunas.

Estas partículas pueden ser adheridas en papel o tejidos y en discos para lijar o desbastar, por otro lado, pueden ser usadas como granos disueltos en algún tipo de líquido, el cual se va depositando parcial o continuamente entre dos superficies.

Instrumento para la caracterización de superficies.

Hasta este punto se debe entender que, para lograr determinar el espesor del recubrimiento de la superficie de la probeta y la resistencia a la abrasión, se debe contar con un equipo que logre un desgaste micro abrasivo, por medio de tres cuerpos, el primero la probeta que se desea encontrar dichos parámetros, el segundo las partículas abrasivas las cuales suelen ser tipo artificial como el óxido de aluminio o polvo de aluminio, y la última parte, es el cuerpo con cierta forma geométrica, la cual ejerza una fuerza normal a la superficie, para que exista la fricción de los tres cuerpos., y es justamente este último cuerpo el que hace que exista una diversidad de equipos debido a las configuraciones de sus diseñadores, los métodos de estos equipos están sustentados bajo las normas ASTM [8], por nombrar algunos equipos tenemos:

- **Abrasión con disco de goma y arena seca:**

Con este instrumento se logra encontrar la resistencia a la abrasión por ralladura, basado en la norma ASTM G-65, utilizando un sistema básico de palancas, se apoya la probeta hacia la rueda de goma, se abre el flujo del abrasivo, siendo arena seca para este ensayo

el cual deposita entre las dos partes, dependiendo de la resistencia y espesor del material se aumenta el peso en la palanca para presionar los tres cuerpos, como se indica en Figura 5. Pero este diseño presenta desventajas en cuanto al abrasivo y a la probeta. Primero al trabajar con abrasivos finos como talcos no se tiene un flujo constante en la tobera, por otro lado, la probeta debe cumplir ciertos requisitos como de paralelismo en la cara a ensayar, dimensiones de la probeta, acabado superficial menor a los $0,8 \mu\text{m}$, lo que la limita para ensayos de depósitos con recargue superficial por soldadura [8].

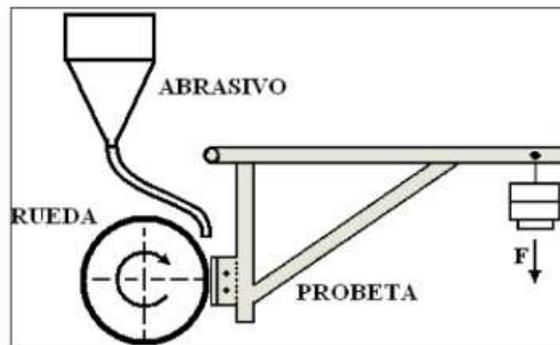


Figura 5. Bosquejo del equipo de ensayo conforme la norma ASTM G-65 [9].

- **Abrasión por rayadura por medio de una espiga.**

Este tipo de aparato consiste en causar una rayadura sobre una superficie abrasiva, con una espiga la cual se fabrica con el material a ensayar, este método sigue la norma ASTM G132-96, por medio de un desplazamiento relativo entre las áreas de contacto, la espiga se mantiene en una posición vertical a la cara del material a rayar, como se indica en la Figura 6, existe diversos tipos de dispositivos, el cual difiere en el movimiento de rotación del material abrasivo, pero en la espiga se carga con pesos que ejerzan la presión suficiente para generar la huella [10].

Este sistema se debe controlar varios parámetros como velocidad de rotación de la espiga, carga, velocidad de traslación que se tiene la espiga sobre el material abrasivo, la distancia de la huella, humedad, temperatura.

Aunque este tipo de sistema es útil para usar distintos tipos de partículas abrasivas y dependiendo de cada una se tienen un distinto resultado, solo se debe controlar la rugosidad y porosidad en la espiga, con el fin de tener evitar errores en las mediciones. La desventaja de que presenta se basa en la dificultad del equipo, el cual se busca controlar los parámetros señalados en cualquier de las configuraciones posibles que indica la norma ASTM G132-96.

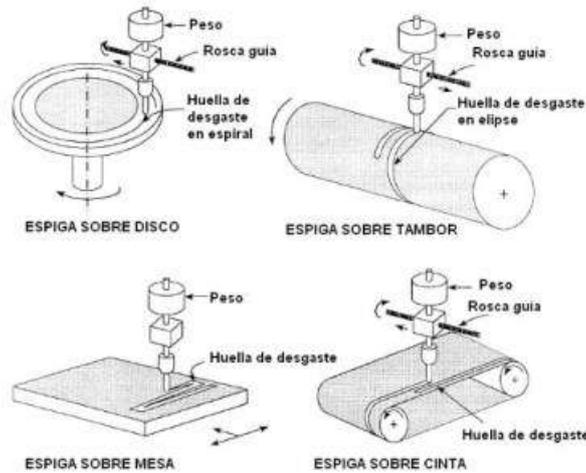


Figura 6. Método de desgaste abrasivo por medio de rayadura [11].

- **Micro abrasión por esfera rotativa.**

Por última instancia, se cuenta con un dispositivo de caracterización de superficies por medio del desbaste micro abrasivo por esfera rotativa en aleaciones ferrosas, está destinado para diversos estudios investigativos para la medición de películas sobre las muestras, ya que es un equipo sencillo y rápido a la hora de encontrar los espesores de los distintos recubrimientos.

Este tipo de ensayo está estipulado en la norma ISO 26423 (2021), donde determina el espesor de las películas por medio de abrasión con cráter, así como los parámetros que se deben considerar para no alterar la tasa y el volumen de desgaste en las muestras ensayadas. Para el método de abrasión consiste en ajustar la muestra de ensayo en las mordazas ubicadas sobre la prensa, ver Figura 7, luego se ubica una esfera de acero, el cual posee un recubrimiento o un tratamiento en la superficie para incrementar la dureza, y se añade las partículas abrasivas que se encuentran disueltas en una solución, generalmente glicerina, se establece el tiempo y las revoluciones que va a girar la esfera, el resultado es un micro cráter, el cual usando un microscopio, ver Figura 8 (a), o un programa CAD de la foto escalada, se puede medir las distancias de diámetros y a través de una simple ecuación determinar el espesor de la o las capas de recubrimiento presente en la muestra [12].

Este tipo de ensayo no es único en muestras rectangulares, sino que, se lo puede realizar en muestras circulares y cilíndricas, como se indica las Figura 8 a y b, respectivamente. La carga estática a la que es sometida la muestra se lo determina por medio del peso de la esfera de acero y el ángulo de inclinación que se ajuste en la prensa.

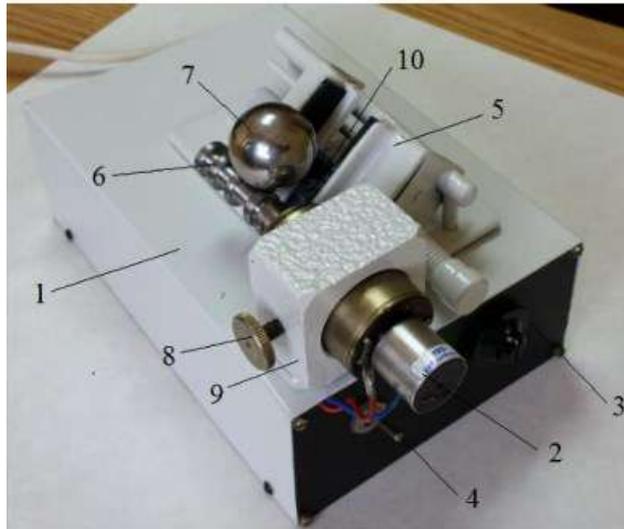


Figura 7. Diseño de calotester KT1: 1) Cuerpo; 2) Motor DC; 3) Regulador de RPM; 4) Switch On/Off; 5) Mordazas; 6) Eje; 7) Esfera de acero; 8) Tornillo de ajuste; 9) Soporte del motor; 10) Muestra de ensayo [13]

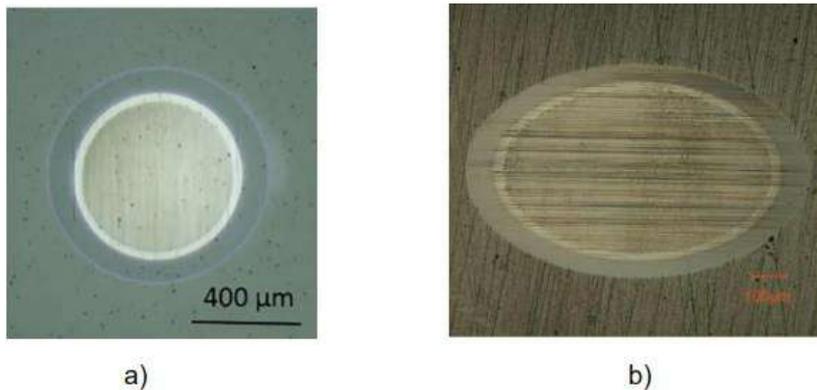


Figura 8. Micrografía de micro cráteres; a) para una muestra de un recubrimiento de Ti-N usando partículas de diamante de $0,25 \mu\text{m}$; b) para un cilindro de 20 mm [14]. Este tipo de modelo es comúnmente llamado “Calotest”, debido al uso de una esfera de acero para generar el micro cráter en la muestra, aun así, se logra encontrar dos tipos: el primero se basa en la esfera libre, como se comentó anteriormente, y el segundo con esfera fija [15], ver Figura 9 b, su funcionalidad es semejante al de esfera libre, salvo que este modelo trabaja a 90° y se aplica una fuerza normal (F_N) preestablecida por el investigador, como se indica en Figura 9 a), cuando entra en contacto con el líquido abrasivo y la muestra aparece una segunda fuerza tangencial (F_T) al punto de contacto, esta configuración permite controlar la velocidad de giro y el desplazamiento, dando el mismo resultado como se ve en la Figura 8 a y b.

El movimiento de rotación de ambos equipos proviene del eje de acero, el cual está conectado a un motor encoder, en el cual por medio de un sistema de control se establece

el tiempo y las revoluciones de giro. (Para más información del sistema del control del equipo Calotest revise la segunda parte perteneciente al componente de control del trabajo de integración curricular).

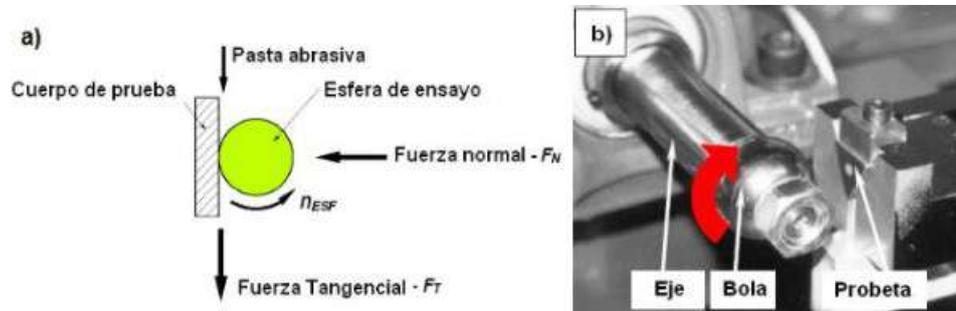


Figura 9. Principio de funcionamiento de esfera fija; a) Diagrama de funcionamiento; b) Calotest de esfera fija [15].

Para empezar con el ensayo de desbaste por micro abrasión con esfera libre, se calibra el punto de contacto que va a haber entre la esfera y la muestra, esto se logra ajustando la prensa hacia la esfera. El movimiento de rotación de la esfera libre es debido a la fuerza de fricción que existe con el eje de acero, aumentando la fricción al usar anillos de goma ajustados en el eje, y es justamente esta rotación libre lo que genera cierta ambigüedad en la velocidad de la esfera, por lo cual muchos autores toman de referencia la misma velocidad angular del eje.

La fuerza normal que se aplica en este ensayo depende del ángulo de ataque α y la distancia S que se deje entre el eje y la muestra, como se indica en la Figura 10 b), según afirma en varios experimentos realizados por Bethke R, al ir variando S y α para una esfera de acero de \varnothing 30 mm se consigue una fuerza normal entre un rango de 0,2 a 0,8N [14], además comenta que, usando un variación de parámetros de ángulo y desplazamiento se llegó a la conclusión que con un ángulo de 60° a una distancia de 15mm garantiza buenos resultados, para esta configuración la fuerza que se aplicada fue de 0,5 N.

Se debe tener en consideración que el coeficiente de fricción entre el eje y la esfera se incrementa al disminuir α . Otros autores recomiendan trabajar el ángulo entre 35 a 40° [16]. La distancia S no debe ser ni muy corta ni muy larga, la norma ISO 26423, recomienda una distancia entre $[1/2$ a $3/4]$ el diámetro de la esfera [12].

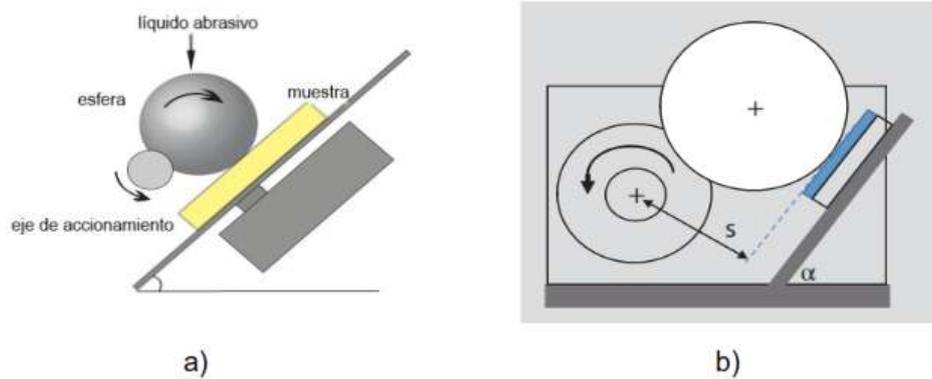


Figura 10. Desbaste por micro abrasión con esfera libre apoyada sobre un eje; a) diagrama de funcionamiento; b) muestra a una distancia S y con un ángulo α [14].

Ecuaciones requeridas para el ensayo por micro abrasión.

Simbología

s = Espesor del recubrimiento o película [μmm]

T = Profundidad total de penetración [μmm]

t = Profundidad de penetración en el sustrato [μmm]

d = Diámetro del cráter del sustrato [μmm]

D = Diámetro del cráter en la película [μmm]

R = Radio de la esfera [μmm]

X = Distancia desde el diámetro externo de la película al diámetro interno del cráter [μmm]

Y = Espesor del anillo formado por la esfera interna y externa [μmm]

v_1 = Velocidad lineal [$\frac{m}{s}$]

ω = Velocidad angular del eje [$\frac{rad}{s}$]

D_{em} = Diámetro del eje al motor [m]

d_s = Distancia de deslizamiento [m]

t_o = Tiempo de operación [s]

V_d = Volumen de desgaste [m^3]

Q_d = Tasa de desgaste [m^2]

F_n = Fuerza normal [N]

w_{esf} = Peso de la esfera [N]

Espesor para placas

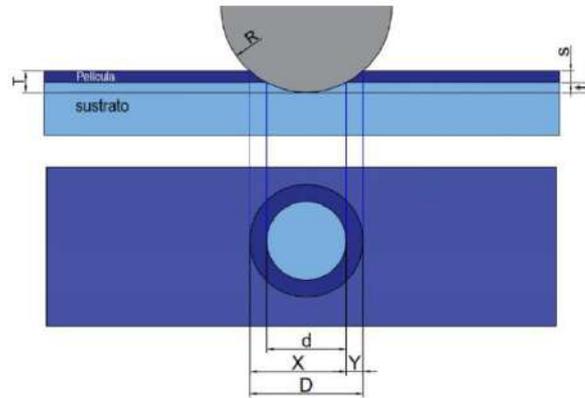


Figura 11. Distancias del cráter generado en el sustrato.

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 11 el espesor de la película está determinado como la diferencia entre la profundidad total de penetración de la esfera en la muestra y la profundidad de penetración en el sustrato.

$$s = T - t$$

Ecuación 1. Espesor de la película.

Construyendo dos triángulos rectángulos con centro en la esfera, la profundidad total de penetración y profundidad de penetración en el sustrato [17], están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$T = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - D^2}$$

Ecuación 2. Profundidad total de penetración en la muestra.

$$t = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - d^2}$$

Ecuación 3. Profundidad de penetración en el sustrato.

Remplazando las ecuaciones 3 y 2 en 1 y arreglando el resultado se obtiene:

$$s = \frac{D^2 - d^2}{8R}$$

Ecuación 4. Espesor de la película en función del radio de la esfera y los diámetros de los cráteres.

Aunque la Ecuación 4 es muy empleada en algunos trabajos, puede simplificarse aún más, observe como en la Figura 11, los diámetros D y d se pueden dejar en función de X y de Y; donde D= X+Y y d = x-y por lo cual se obtiene la ecuación más resumida para el cálculo del espesor en placas.

$$s = \frac{X * Y}{2R}$$

Ecuación 5. Espesor del recubrimiento en placas

A continuación, se detallan otras fórmulas empleadas en el ensayo Calotest [5] [8].

- Velocidad lineal

$$v_l = \omega * \frac{D_{em}}{2}$$

Ecuación 6. Velocidad lineal

- Distancia de deslizamiento

$$d_s = V_l * t$$

Ecuación 7. Distancia de deslizamiento

- Volumen de desgaste

$$V_d = \frac{\pi * d^4}{64 * R} = \frac{\pi * (X - Y)^4}{64 * R}$$

Ecuación 8. Volumen de desgaste.

- Tasa de desgaste

$$Q_d = \frac{V_d}{d_s}$$

Ecuación 9. Tasa de desgaste.

- Fuerza normal

$$F_n = w_{esf} * \cos\alpha$$

Ecuación 10. Carga normal en la muestra.

- Coeficiente de desgastamiento

$$k_d = \frac{\pi * d^4}{64 * R * d_s * F_n} = \frac{\pi * (X - Y)^4}{64 * R * d_s * F_n}$$

Ecuación 11. Tasa de desgaste específica.

- Espesor para muestras cilíndricas

Para muestras cilíndricas se puede usar la Ecuación 5.

1.6 Benchmarking

Uno de los pasos para el diseño de un prototipo se basa en realizar un estudio del mercado nacional e internacional, es lógico pensar que la idea de un producto, a veces, no es algo tan innovador, y este se lo puede encontrar en mercados o patentado, aun así, es de gran utilidad para examinar, tener ideas y conocer su precio en el mercado, a este estudio se le conoce como benchmarking [18].

Haciendo un estudio de mercado a nivel nacional se pudo evidenciar la falta de producción de este equipo, por lo cual se empezó la búsqueda en mercados internacionales, la primera fuente de información acerca del producto fue la empresa austriaca con sede en Graz, llamada Anton Paar, la cual es una empresa comprometida con la creación, fabricación y venta de equipos tecnológicos de procesos para laboratorios, en el catálogo se eligió el equipo Calotest compacto modelo **Cat2c**, lo cual se procedió a contactar con dicha empresa y en su correo notificaron de un distribuidor de sus productos en Quito-Ecuador con sede en Carcelén, Assinflit.Cia.Ltda. La información técnica se encuentra en la siguiente Tabla 1. **CAT2c** es un instrumento diseñado para analizar recubrimientos, cuyos espesores estén entre 0,1 a 50 μm , empleado para materiales cuyos recubrimientos sean obtenidos mediante el uso de pinturas, lacas, polímeros, revestimientos de oxidación anódica, depósitos galvánicos y químicos, deposición física de vapor (PVD), deposición química de vapor (CVD). Útil para muestras planas, cilíndricas o esféricas que se fijan en el porta muestras.

Otra empresa de referencia para los productos fue la compañía alemana BAQ GmbH, la cual desarrolla y produce aparatos de instrumentación para distintos métodos de medición, para este caso se cotizó el modelo **Kalo Max NT II**, ya que a diferencia de los otros modelos este cuenta con sistema de automatizado de goteo del líquido abrasivo, ver Tabla 2, y el último modelo de la misma empresa el **Kalo Max II** donde sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 1. Datos técnicos del equipo de Calo test modelo CAT2c

Producto	Especificaciones técnicas
 <p data-bbox="336 987 735 1021">Figura 12.Modelo CAT2c [19]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Revoluciones del eje 10 a 3000 rpm - Muestra de dimensiones de trabajo: ancho máx. 32 mm y diámetro máx. 34 mm - Abrasión en un rango de tiempo: 1 a 100000 s. - Esferas estándar con diámetros: 10, 15 20, 25,4 y 30 mm. - Alimentación: 100 a 240 VAC/ +24 VDC. - Alimentación del motor: 24 V - Par nominal (máx. continuo): 0,028 Nm. - Frecuencia de red: 50-60 Hz. - Compatible con las normas: ISO EN 1071-2/ ISO 26423 / VDI 3198
Precio (USD)	\$ 13. 731,76

Tabla 2. Datos técnicos del modelo Kalo Max NT II

Producto	Especificaciones técnicas
 <p data-bbox="316 1850 759 1933">Figura 13.Modelo Kalo Max NT II [20]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro de las esferas: min Ø 20 mm máx. Ø 30 mm. - Rango de velocidad: 20-500 1/min. - Programación: camino de abrasión, periodo de abrasión, número de revoluciones, tiempo de dosificación del líquido abrasivo, etc. - Ancho máx. para muestras planas: 50 mm. - Rango de apertura máx. para muestras circulares: 3-30 mm. - Dimensiones (Largo/ancho/alto): 305x295X235 mm. - Rango de voltaje: 85-264 VAC

	<ul style="list-style-type: none"> - Rango de frecuencia de salida: 47-63 Hz. - Peso: 8 kg. - Presión de suministro de aire: 6 bar -
Precio (EURO/USD)	\$ 7660 / 7988,30

Tabla 3. Datos técnicos del modelo Kalo Max II

Producto	Especificaciones técnicas
 <p data-bbox="309 1330 762 1361">Figura 14. Modelo Kalo Max II [21]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad del eje: 100- 1200 1/min. En pasos de 100. - Rango de tiempo de abrasión: 5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60, 70,80,90,100.110.120,150,180 s. - Diámetro de la esfera: 20 y 30 mm - Ancho máx. para muestras planas: 50 mm. - Rango de apertura máx. para muestras circulares: 3-30 mm. - Inclinación de las muestras: 60° - Displays de LED (14 mm de alto): 4 dígitos para revoluciones. 4 dígitos para tiempo de abrasión. 1 dígito para número del programa. - Rango de voltaje: 85-264 VAC - Rango de frecuencia de salida: 47-63 Hz. - Dimensiones (Largo/ancho/alto): 300x295X235 mm. - Peso: 8 kg.
Precio (EURO/USD)	\$ 4890 / 5098,07

2. METODOLOGÍA

En este apartado se definirán y detallarán todos los pasos respectivos que se deben llevar a cabo para la recreación del diseño de un Calotest, para esto se acudirá a una herramienta de diseño que ha permitido por muchos años la construcción no solo de un producto sino de una producción en serie, debido a su estructuración detallada y simultánea de sus métodos, con el fin de garantizar la obtención del prototipo, se evaluará la mejor alternativa siguiendo los criterios definidos por la ingeniería concurrente.

El primer paso en un proceso de diseño consiste en una investigación preliminar, en el cual se recompila toda la información relevante sobre los distintos modelos, formas de funcionamiento, alcances y limitaciones que pueden tener los instrumentos para la medición de espesores y desgaste. La cual se analizará en la casa de la calidad junto con la voz del ingeniero y las necesidades del usuario, con esto se logra identificar las especificaciones técnicas más importantes que se deberá tener en cuenta en el prototipo.

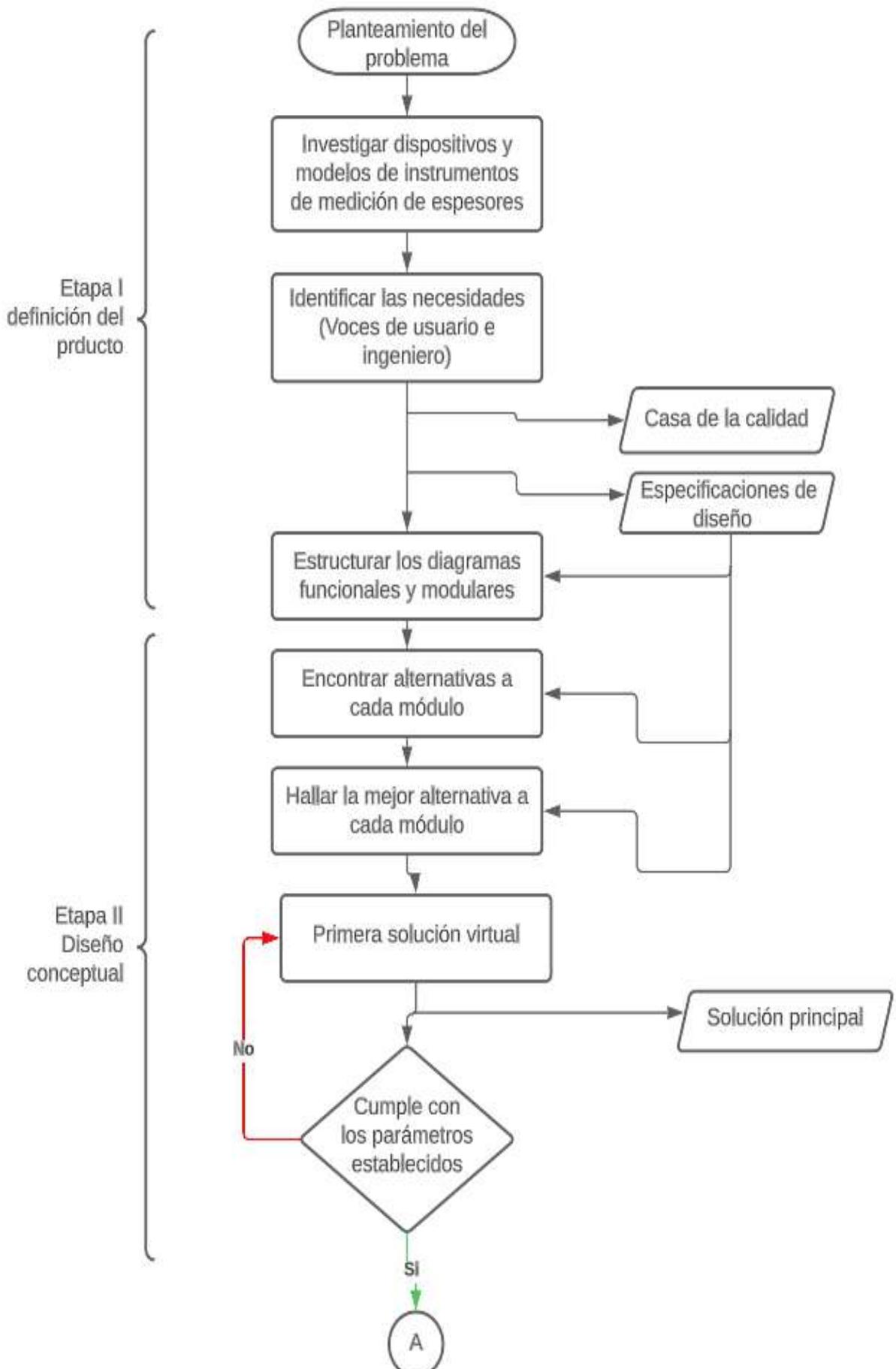
Luego de tener la especificación de diseño, se procede a un desarrollo del análisis funcional y modular que tendrá el dispositivo, en el cual se detalle sus funciones y se pueda clasificar en módulos, lo cual facilita escoger las mejores alternativas.

Se utilizará la técnica ordinal corregida de criterios ponderados (OCCP) para elegir metódicamente la mejor respuesta para cada módulo por medio de una matriz de decisión, obteniendo una solución virtual con INVENTOR.

Una vez obtenida, la primera solución virtual del equipo servirá para la preselección de componentes y materiales, los cuales serán examinados y modificados hasta lograr alcanzar un diseño satisfactorio, que cumpla con los requerimientos establecidos. Con este modelo final se elaborará el plano de ensamble y los planos de taller.

Obtenidos los planos, se comienza a describir las herramientas y procesos de manufactura que se requieran para la construcción del dispositivo. Por último, se une los dos componentes de diseño y de control para obtener el funcionamiento total del dispositivo, con el cual servirá para realizar las pruebas respectivas de funcionamiento.

A continuación, se presenta las etapas de proceso de diseño, ver Figura 14, donde se representa la metodología planteada anteriormente.



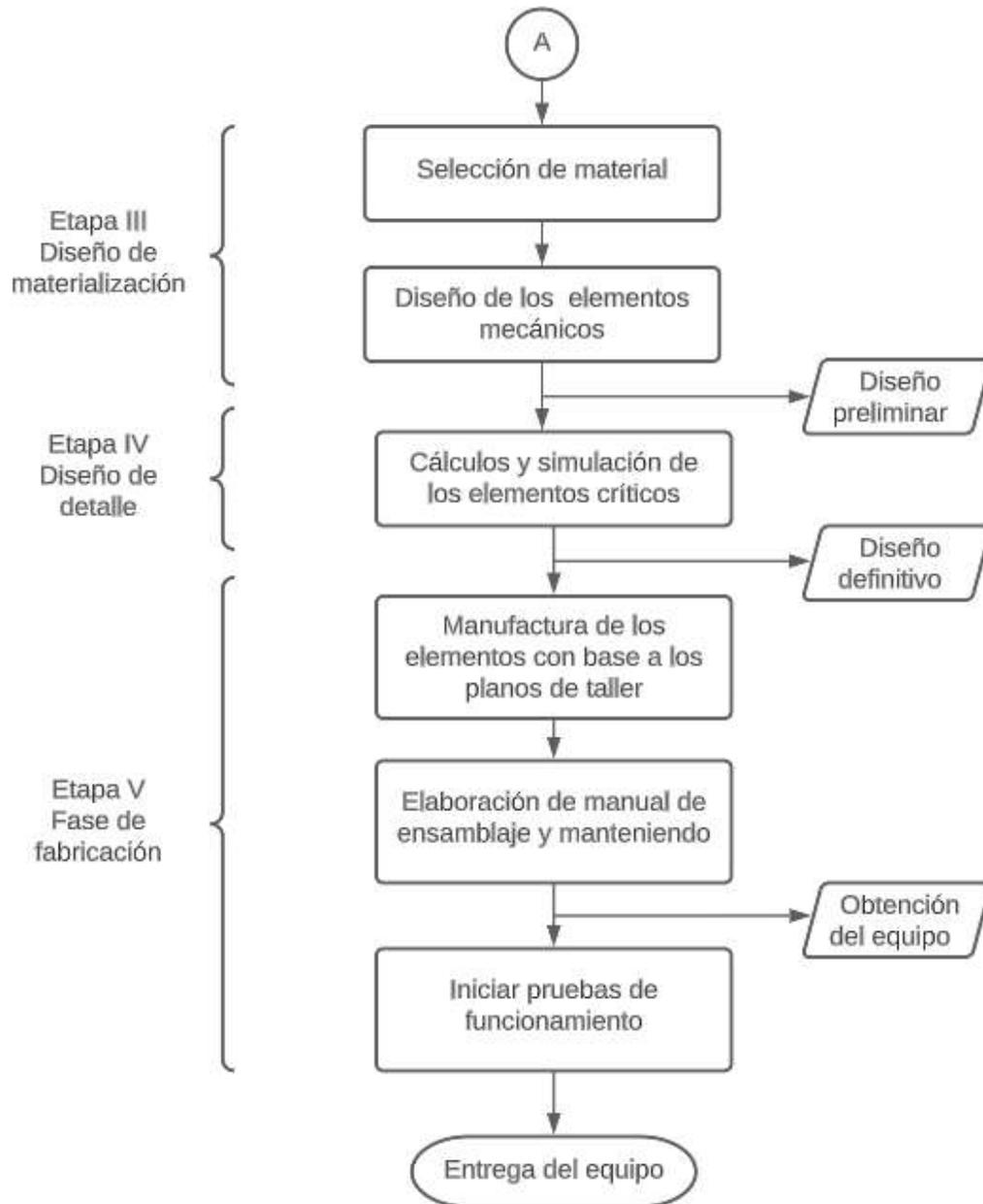


Figura 15. Etapas de procesos de diseño-metodología [22]

2 1. Establecimiento de requisitos técnicos

Principios para tener en cuenta.

El formato de presentación de este documento de trabajo de integración curricular está basado en la necesidad de equipar con un dispositivo de caracterización de superficies para determinar los espesores y resistencia al desgaste de muestras, para fin académico en el Laboratorio de Metalografía. Por lo cual se tomó de referencia los diseños de modelos existentes, los cuales servirán como bases para moldear el prototipo final y lograr satisfacer la necesidad del ingeniero encargado del laboratorio.

Casa de la calidad.

El desarrollo del producto final debe satisfacer las necesidades y requerimientos del usuario, los cuales deben ser cuantificados por el ingeniero a cargo del diseño y se evalúan por medio de una herramienta de diseño, esto equivale a una de las etapas de la creación de una función de calidad del producto. [22], así, por medio de esta matriz se logra desplegar los requerimientos técnicos del prototipo alcanzando en gran parte la demanda del usuario.

Solicitud del cliente

El instrumento debe tener las siguientes características para satisfacer las solicitudes del cliente.:

- Que se encuentre en un precio asequible.
- Que el mantenimiento sea sencillo
- Que el material sea anticorrosivo y resistente.
- Que se pueda inclinar la base de sujeción de la mordaza.
- Que se pueda acercar o alejar la muestra al eje.
- Que se pueda sujetar muestras grandes hasta 10 cm de alto y 60 cm de ancho.
- Que sea fácil de usar.
- Que no sea muy grande.
- Que no sea muy pesada.
- Que alcance altas revoluciones.
- Que funcione con electricidad.

Sugerencia del ingeniero

Tras escuchar las demandas del cliente, pasamos a interpretar las especificaciones técnicas.

- Costo del equipo.
- Mantenimiento.
- Tipo de material.
- Grado de inclinación.

- Desplazamiento transversal.
- Apertura de la mordaza.
- Nivel de complejidad.
- Dimensiones del equipo.
- Peso del equipo.
- RPM del motor.
- Fuente de alimentación.

Puntos para tener en cuenta en la elaboración de la casa de la calidad

El resultado de la casa de la calidad se encuentra disponible en el Anexos I, la cual se siguió las recomendaciones planteadas por el autor Ribas en el capítulo 3, herramientas para el diseño concurrente [23] , aun así, se requiere detallar algunos criterios considerados para llenar esta herramienta.

- Primero en la columna A referente a la evaluación del usuario donde se analiza la propia empresa, se asignó la puntuación de 1, ya que, no se contaba con el producto previamente.
- La columna B es la única la empresa con un distribuidor en la capital, aun así, se dio una puntuación baja, ya que solo importan los instrumentos bajo pedido y no se conoce muchas de sus funciones.
- Las columnas C y D se compararon la misma empresa, pero con dos modelos diferentes.

Resultado de la casa de la calidad.

Debido a que el cliente no manifestó que considera alguna demanda como estimulante, unidimensional o básica, se estableció de la siguiente manera:

- Para las demandas básicas: 1, 3, 4, 5, 7 y 10
- Para las demandas unidimensionales: 6 y 11
- Para las demandas estimulantes: 2, 8 y 9

Se comienza con un estudio de la competencia desde la columna A hasta la J, enfocándose en aquellas demandas que alcanzaron un alto porcentaje de ponderación, el autor Ribas, opina que, debe concentrarse en aquellas que satisfagan el 65%. Para este caso de

estudio, se tiene 6 puntos fuertes que alcanzan el 67,47% de las demandas, detallándose de mayor a menor se va a considerar: precio cómodo, inclinación de la balanza, lograr altas revoluciones, un material resistente y anticorrosivo, fácil de usar y que no sea muy pesada.

Finalmente, se realiza un análisis similar, donde se encuentren los altos porcentajes de incidencias para escoger las características técnicas las cuales 6 de ellas suman un total de 73,4%, detallándose de mayor a menor se va a considerar: Tipo de material, costo del equipo, grado de inclinación, nivel de complejidad, peso del equipo y rpm del motor.

Especificaciones técnicas

En la Tabla 4 puntualiza las especificaciones técnicas que se desean y requieren en el equipo a desarrollar, siguiendo el formato planteado por Ribas en el capítulo 2 [24].

Tabla 4. Especificaciones técnicas del dispositivo

Empresa de ingeniería		Producto:		Fecha inicial	
EPN		CALO TEST		5/06/2023	
				Fecha de revisión:	
				23/08/2023	
Especificaciones					
CONCEPTO	FECHA	PROPONE	R/D	DESCRIPCIÓN	
Función	5/06/2023	C/I	R	Finalidad: lograr caracterizar las superficies, logrando determinar su espesor y la resistencia al desgaste para distintos tipos de materiales recubiertos	
	5/06/2023	C/I	R	Sujetar muestras pequeñas	
	5/06/2023	C	MR	Sujetar muestras hasta 60 cm	
Dimensiones	5/06/2023	C/I	R	Base de instalación del equipo de (Largo/ancho/alto): 300x295X235 mm.	
	5/06/2023	C/I	R	Peso del equipo entre 6 a 8 kg	
Energía	5/06/2023	D	R	Conectarse a red eléctrica: voltaje 110, frecuencia 60 Hz	
	5/06/2023	C/I	R	Desplazamiento angular de 0 a 90°	

Movimiento	5/06/2023	C/I	R	Desplazamiento transversal hacia el eje: 0 a 5 cm de juego
	5/06/2023	I	MR	Desplazamiento angular de 30° a 60°
	5/06/2023	I	R	Desplazamiento horizontal del eje del motor
Fuerzas	5/06/2023	C/I	R	Par nominal del motor 28 mNm.
Materiales	5/06/2023	C/I	R	Usar aluminio para la fabricación de los elementos de la prensa y base del motor
	5/06/2023	C/I	MR	Usar Duralón para la fabricación de los elementos de la prensa y base del motor
Aspectos legales	5/06/2023	N	R	ISO EN 1071-2 / ISO 26423 /VDI 3198

Propone: C: Cliente **D:** Diseñador **I:** Ingeniería **N:** Norma

R/D: R: Requerimiento **MR:** Modificación del requerimiento

(Fuente: propia)

2.2. Elección de posibles soluciones

Estructura funcional y modular para el diseño de un Calotest.

Estructura funcional global y subfunciones.

Para completar con éxito el reto de diseño del dispositivo, se debe introducir una función global en la cual se establece en una representación muy esquemática el propósito que tendrá la máquina, pero esto es una solución banal, por lo cual se debe ampliar en subfunciones que logren abarcar de una manera sistemática las distintas tareas que tendrá el equipo para lograr obtener la muestra como resultado final. Dependiendo de la complejidad de la máquina se empieza por el nivel cero como función global y se subdivide en niveles cada vez más específicos.

Una vez que se logre establecer todas las subfunciones se agrupan en tareas de igual similitud, para clasificarlas en módulos, así se busca encontrar alternativas que satisfagan cada módulo

Ribas establece una serie de simbología con el propósito de facilitar la información al diseñador [25], por lo cual las funciones estarán especificadas en un rectángulo de línea

continua, los flujos de entrada y salida con flechas, si es una flecha ancha se tratará de material, si es delgada de energía y si es entre cortada de señal, en cambio para el módulo se tendrá un polígono de línea discontinua.

Nivel 0

En la Figura 16 se representa la función global.



Figura 16. Diagrama de la función global del equipo [22]

Nivel 1

Para especificar las funciones secundarias que tendrá el equipo se abre en la primera subfunción, el cual se indica en la Figura 17.

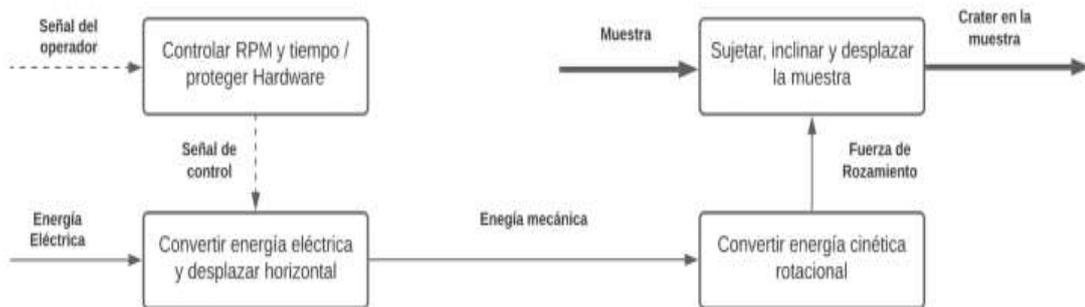


Figura 17. Diagrama de la subfunción 1 [22].

Nivel 2

Debido a que se necesita expandir aún más las funciones secundarias para incluir otras tareas que debe contemplar en el equipo se crea otra subfunción 2, representada en la siguiente Figura 18

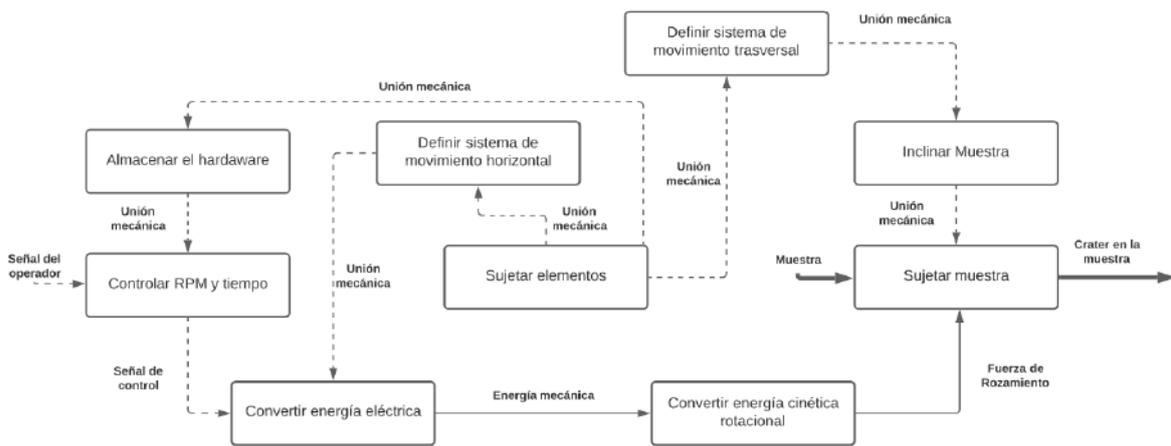


Figura 18. Diagrama de subfunción 2 [22].

Estructura modular.

A partir del último nivel alcanzado donde se abarcan todas las tareas que tendrán el equipo se procede a relacionar funciones que sean compatibles por medio de módulos, para proceder a analizar y solucionar de una manera ordenada y concisa cada función, como se muestra en la Figura 19

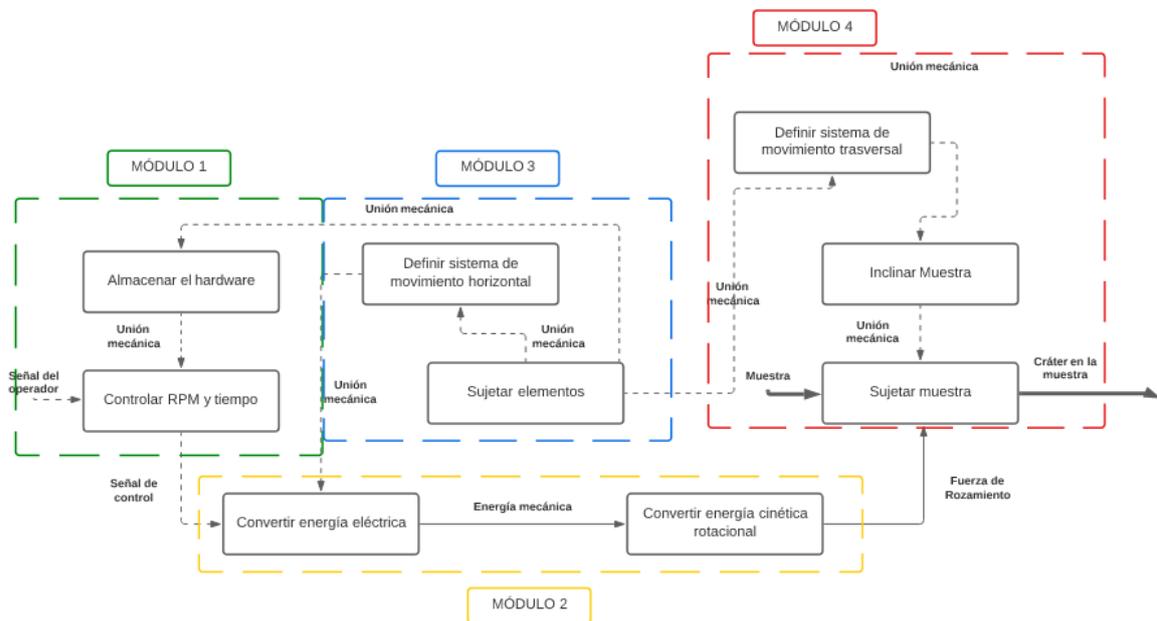


Figura 19. Diagrama modular de la subfunción 2 [22].

Planteamiento de alternativas.

De acuerdo con el anterior punto, se ha establecido 4 módulos que engloban todas las funciones o tareas en que deberá realizar el dispositivo denominado Calotest, las cuales se van a clasificar en:

Módulo 1.- almacenaje y control.

Módulo 2.- transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción.

Módulo 3.- Fijación del motor.

Módulo 4.- sujeción y movimientos de la muestra.

Para cada módulo se analizará las posibles soluciones de cada una de las funciones planteadas en la Figura 19, encontrando alternativas disponibles que puedan satisfacer la tarea, el cual se representará en una matriz morfológica para cada una de las combinaciones posibles de las alternativas.

Módulo 1.- almacenaje y control.

El módulo 1 está constituido por las siguientes funciones:

- Controlar las RPM y el tiempo.
- Almacenar el hardware.

Controlar las RPM y el tiempo.

Uno de los principales deseos del cliente requería controlar las RPM y el tiempo de funcionamiento del instrumento para cada una de las muestras, para cumplir con esa demanda se requiere el control electrónico del motor por medio de un circuito controlado con Arduino, aunque aquí se presenta la solución, se sugiere completar la información con la segunda parte de este componente.

Circuito con ARDUINO UNO.

Tabla 5. Características del circuito ARDUINO UNO.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Se puede programar y controlar más sensores y actuadores.- Puede controlar motores de 12 y 24 V.	<ul style="list-style-type: none">- Al cambiar el motor se debe cambiar el driver y reprogramar las entradas del Arduino.- precio

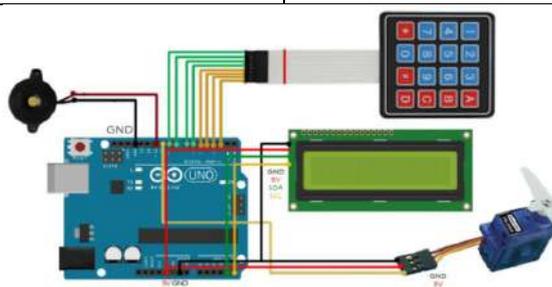


Figura 20. Circuito de control de RPM para un motor con ARDUINO UNO [26].

Almacenar el Hardware.

Esta función se debe almacenar todos los componentes electrónicos que va a poseer el equipo, para mantenerlos lejos de agentes externos que puedan dañar o interrumpir su correcto desempeño. para esta solución solo se plantea una alternativa que fue expuesta por el cliente, basada en el modelo de la base del equipo que deseaba.

Caja de almacenamiento.

Tabla 6. Características de la caja de almacenamiento.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Espacio suficiente para agregar otros sensores o actuadores en trabajos futuros.- Espacio grande y con ranuras para circulación de aire.- Fácil construcción y ensamblado.- Extracción fácil del equipo.- Precio económico.	<ul style="list-style-type: none">- <u>Se asegura un buen ensamble si el material se corta con láser.</u>

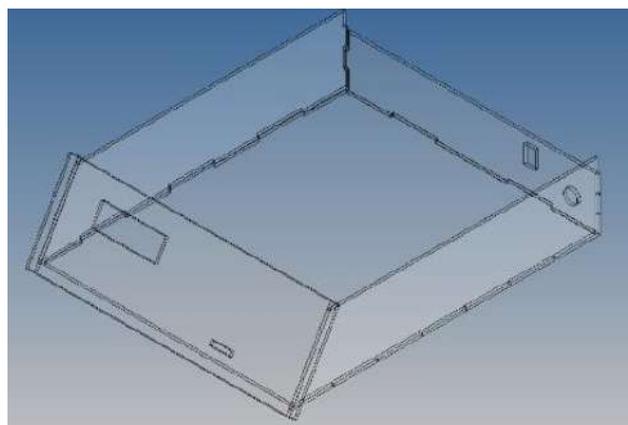


Figura 21. Base de acrílico.

(Fuente: propia)

Opcion para la solución del módulo 1

Tabla 7. Alternativa para el módulo 1

Función	componente
Controlar las RPM y el tiempo	 <p>The diagram consists of two rounded rectangular boxes. The top box contains the text 'Circuito con arduino UNO'. A green arrow points downwards from the bottom center of this box to the top center of the second box, which contains the text 'Caja de almacenamiento'.</p>
Almacenar el Hardware	
Alternativa	Alternativa 1

Alternativa 1 para el módulo 1.

Tabla 8. Desventaja y ventajas de la alternativa 1 del módulo 1.

Almacenaje y control		Modelo
Ventaja	<p>Espacio suficiente para ventilación a los componentes electrónicos.</p> <p>Inclinación delantera para mejor visualización de la pantalla LCD.</p> <p>Fácil extracción para posibles mantenimientos.</p> <p>El material es resistente y liviano.</p>	 <p>The image shows a 3D perspective view of a black, rectangular electronic enclosure. The front panel is slightly angled downwards. It features a small blue LCD screen on the left side and a cluster of red and blue buttons on the right side. The top of the enclosure is open, revealing internal components like a printed circuit board (PCB) with various electronic components mounted on it.</p>
Desventaja	<p>Costos de los componentes y ensamble de la caja.</p>	

Figura 22. Alternativa 1 del módulo 1.

(Fuente: Propia)

Módulo 2.- Transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción.

El moduló 2 está constituido por las siguientes funciones:

- Convertir energía eléctrica.
- Convertir energía mecánica rotacional.

Convertir energía eléctrica.

Los motores son máquinas eléctricas empleados para convertir energía eléctrica en energía mecánica. Para este caso de estudio, se busca un motor pequeño que logre alcanzar altas RPM en un corto tiempo, por lo tanto, solo se busca transmitir la velocidad angular por medio del contacto entre el eje y una esfera que tiene una masa muy pequeña, en otras palabras, no se requiere un motor con par muy alto.

Motor DC con encoder.

Tabla 9. Características del motor DC con encoder.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Trabaja con una alimentación de 12 V- Su velocidad al vacío es de 3800 RPM.- Su par es de 0,03 Nm.- El encoder permite obtener una señal de la velocidad del motor.	<ul style="list-style-type: none">- Debido a que es un elemento importado, es difícil conseguirlo en almacenes electrónicos.- Alto precio en el mercado.



Figura 23. Motor DC CON encoder [27].

Motor DC 775

Tabla 10. Características del motor DC 775

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Trabaja con una alimentación de 6 a 12 V.- Su velocidad al vacío es de 3000 RPM.	<ul style="list-style-type: none">- No tiene encoder.

<ul style="list-style-type: none"> - Su par es de 0,048 Nm - Ligeró, silencioso y pequeño. - Disponible en almacenes nacionales. - Precio moderado. 	
---	--



Figura 24. Motor DC 775 [28]

Convertir energía cinética rotacional.

De la salida del motor se tiene energía mecánica, el cual se transmite por su eje a otro elemento mecánico, en este caso, para obtener energía cinética rotacional, se diseñará un eje de acero, el cual tendrá la función de transmitir la velocidad angular, el cual se tiene dos casos: una esfera que rota libre y esta simplemente apoyada sobre el eje y la muestra o una esfera fija en el eje., con esto se logra obtener a la salida una fuerza de rozamiento causado por el apoyo de la esfera en la muestra, además que, usando un líquido abrasivo se logra crear un cráter en la muestra.

Eje acanalado para la esfera libre.

Tabla 11. Características del eje acanalado para la esfera libre.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Corta longitud del eje - Diámetro del eje pequeño. - Fácil de mecanizar. - Precio económico. - Requiere un soporte 	<ul style="list-style-type: none"> - Concentradores de esfuerzos en cambio de sección.

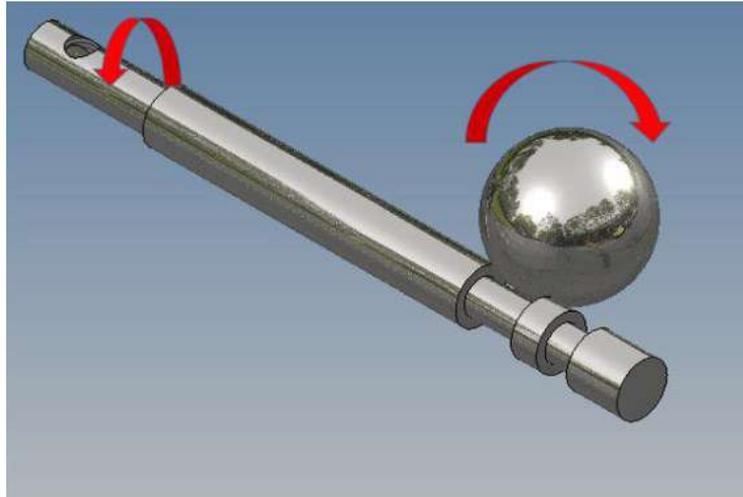


Figura 25.Eje acanalado para esfera libre.

(Fuente: propia)

Eje con esfera fija.

Tabla 12. Características del eje acanalado para la esfera fija.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se debe colocar dos soportes en los extremos para evitar el pandeo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Debido a los soportes ocuparía más espacio en la base del equipo. - Requiere de un diámetro grande. <p>Mayor dificultad de mecanizar lo que encarece el costo de fabricación.</p> <p>Este diseño hace que la muestra deba acercarse al eje y por medio de un juego de pesas causar la presión requerida, ver Figura 5.</p>

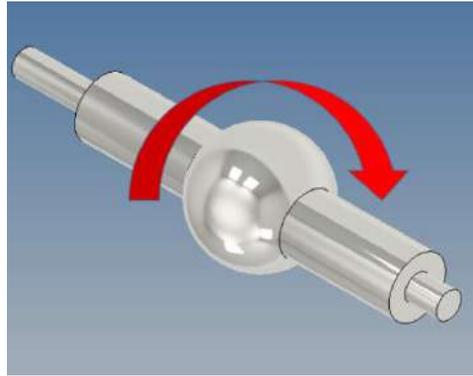


Figura 26.Eje con esfera fija.

(Fuente: propia)

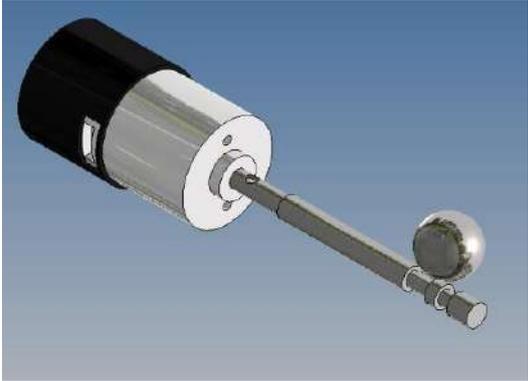
Opciones para las soluciones del módulo 2.

Tabla 13. Alternativas para el módulo 2.

Función	componente			
Convertir energía eléctrica	Motor DC con encoder		Motor DC 775	
Convertir energía cinética rotacional	Eje acanalado para esfera libre		Eje con esfera fija	
Alternativa	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4

Alternativa 1 para el módulo 2

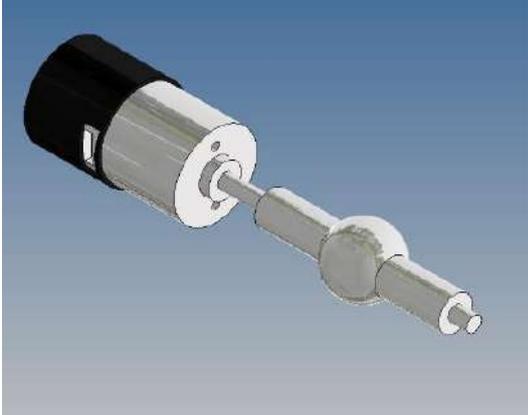
Tabla 14. Desventajas y ventajas de la alternativa 1 para el módulo 2.

Transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción		Modelo 1
Ventaja	Por medio del encoder se podría controlar el RPM del eje, para la unión requiere de un prisionero y el mecanizada del eje es fácil y barato.	

desventaja	Debido a su diseño con encoder el soporte debería ser más robusto.	Figura 27. Alternativa 1 módulo 2 (Fuente: Propia)
-------------------	--	--

Alternativa 2 para el módulo 2

Tabla 15. Desventajas y ventajas de la alternativa 2 del módulo 2.

Transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción		Modelo 2
Ventaja	Se necesita un motor de mayor potencia lo cual lograría alcanzar mayores RPM.	 <p>Figura 28. Alternativa 2 módulo 2 (Fuente: Propia)</p>
desventaja	Se incrementaría el costo y la dificultad de encontrarlo en el mercado.	

Alternativa 3 para el módulo 2.

Tabla 16. Desventajas y ventajas de la alternativa 3 del módulo 2.

Transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción		Modelo 3
Ventaja	Se encuentra fácil y accesible en el mercado, la unión requiere de un prisionero y el mecanizada del eje es fácil y barato.	

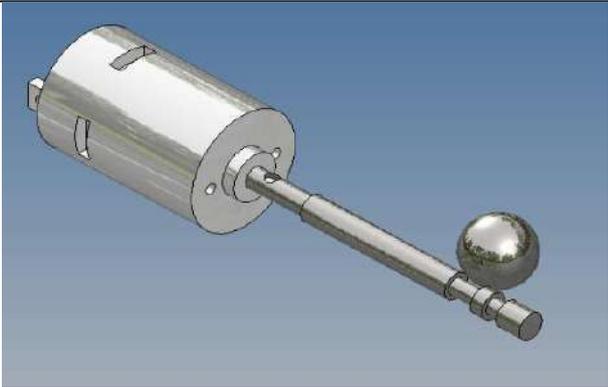
	Carece de enconder, pero usando un sensor óptico de velocidad se arregla este detalle.	
desventaja	En caso de alguna avería en el motor es recomendable comprar uno nuevo.	

Figura 29. Alternativa 3 módulo 2.
(Fuente: Propia)

Alternativa 4 para el módulo 2.

Tabla 17. Desventajas y ventajas de la alternativa 4 del módulo 2.

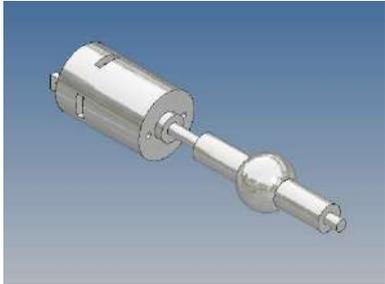
Transmisión de velocidad angular y fuerza de fricción		Modelo 4
Ventaja	Para el trabajo del eje el nuevo motor debería tener una mayor potencia y por ende más altas revoluciones.	
desventaja	Tal como el modelo 2 por el diámetro del eje se buscaría un motor más robusto lo que hace que se incremente su precio y se dificulte encontrarlo en el mercado nacional.	

Figura 30. Alternativa 4 módulo 2.
(Fuente: Propia)

Módulo 3.- Fijación de motor.

El módulo 3 está constituido por las siguientes funciones:

- Definir sistema de movimiento horizontal
- Sujetar elementos.

Definir sistema de movimiento horizontal

Al momento de generar el cráter en la muestra se requiere tener un movimiento horizontal para desplazar el eje a otra posición y generar un nuevo cráter, una solución para este problema era que la mordaza donde sujeta la muestra lograra tener este desplazamiento, pero como se verá más adelante ya existen tres movimientos en la muestra lo que dificulta el diseño al aumentarle otra más, por eso el cliente propuso tener ese movimiento en el desplazamiento del motor, tal como se observa en el modelo de la Figura 12 del Benchmarking.

Base para motor fija con acanalado.

Tabla 18. Características de la base para el motor fija con acanalado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Se puede unir con pernos a la base del equipo.- La longitud de su base permite sujetar la carcasa del motor y reducir el momento causado por la fuerza aplicada al eje.- La selección acanalada el desplazamiento lineal para la carcasa del motor.	<ul style="list-style-type: none">- Precio de maquinación.

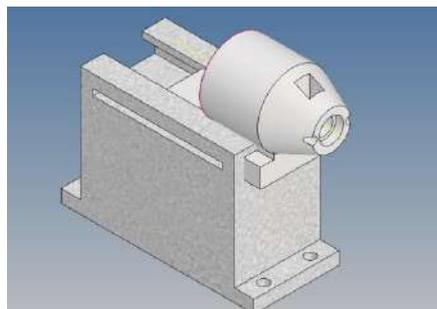


Figura 31. Base de motor fija con acanalado

(Fuente: propia)

Base para motor de sujeción articulada.

Tabla 19. Características de la base para el motor con sujeción articulada.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Tiene 3 grados de libertad para movimiento vertical, horizontal y transversal.- Puede sujetar distintos tipos de motores.	<ul style="list-style-type: none">- Requiere de base magnética para ubicar en la disposición deseada del motor.- Un alto costo debido a la base magnética.

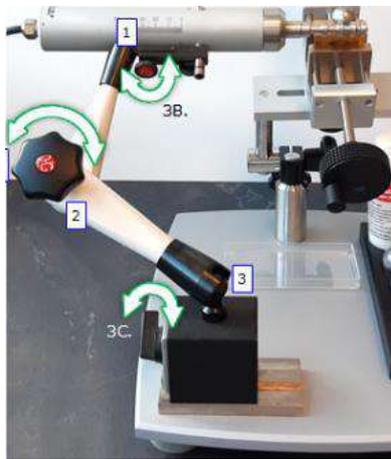


Figura 32. Base de motor de sujeción articulada [19].

Sujetar elementos.

Esta función se trata de la base general del equipo, el cual soportara los distintos soportes que se diseñen para el motor, las bases usadas para la ubicación de la muestra, y la caja de almacenamiento del hardware mencionado en el módulo 1, como se explicó anteriormente el cliente quería un diseño único para la base con una inclinación en el frente para mejorar la visualización de la pantalla led.

Base del equipo

Tabla 20. Características de la base del equipo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Si se usa un chapado de acero se logra soportar el pandeo	<ul style="list-style-type: none">- Al ser fabricado de una lamina de acero aumenta su peso.

<p>provocado por el peso de los diversos componentes.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permite al operador obtener una sola posición de visualización para la pantalla, así como, el proceso del ensayo 	
--	--

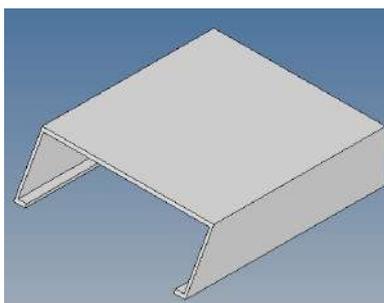


Figura 33. Base de sujeción.

(Fuente: propia)

Opciones para las soluciones del módulo 3

Alternativas para el módulo 3

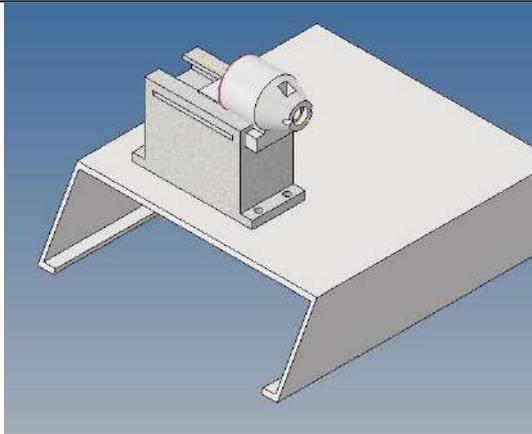
Tabla 21. Alternativas para el módulo 3

Función	componente
Definir sistema de movimiento horizontal	
Sujetar elementos	
Alternativa	Alternativa 1 Alternativa 2

Alternativa 1 para el módulo 3.

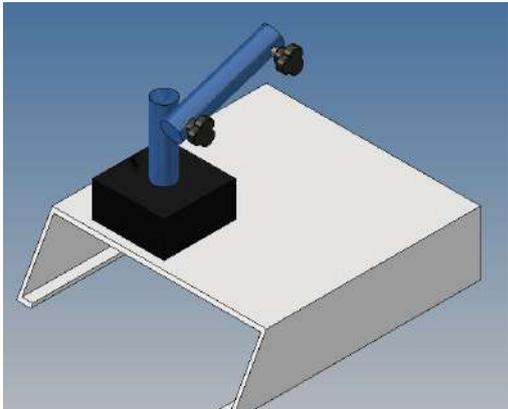
Tabla 22. Desventajas y ventajas de la alternativa 1 del módulo 3.

Fijación del motor		Modelo 1
Ventaja	Se logra adaptar a la carcasa diseñada	

	para el motor, y disminuye un movimiento adicional en las bases de sujeción de la muestra.	 <p>Figura 34. Alternativa 1 módulo 3 (Fuente: Propia)</p>
desventaja	Precio por la fabricación de los 3 elementos	

Alternativa 2 para el módulo 3

Tabla 23. Desventajas y ventajas de la alternativa 2 del módulo 3.

Fijación del motor		Modelo 1
Ventaja	Gran movilidad para el motor.	 <p>Figura 35. Alternativa 2 módulo 3 (Fuente: Propia)</p>
desventaja	Base magnetizada difícil de conseguir en el mercado, aunque se puede usar de otro instrumento como un palpador, pero su precio es elevado además de otros costos de modificaciones.	

Módulo 4.- sujeción y movimientos de la muestra.

El módulo 4 está constituido por las siguientes funciones:

- Sujetar muestra
- Inclinarse muestra
- Definir sistema de movimiento transversal.

Sujetar muestra.

Tal como declaró el cliente, se busca un diseño de una mordaza que logré sujetar muestras pequeñas y grandes hasta 10 cm de alto y 60 cm de ancho, además manifestó sujetar muestras planas, cilíndricas y circulares, por lo que se plantea dos alternativas para esta función.

Mordaza acanalada para guía.

Tabla 24. Características de la mordaza acanalada para la guía.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Se puede maquinar fácilmente en un CNC.- Fácil ajuste manual- Fácil desarme de sus componentes.- Se puede sujetar muestras circulares con los pernos Allen en la cara superior de la mordaza.	<ul style="list-style-type: none">- Tiempo de fabricación.

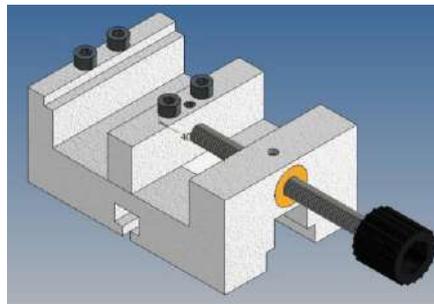


Figura 36. Mordaza acanalada para la guía.

(Fuente: Propia)

Mordaza con ejes guías.

Tabla 25. Características para la mordaza con ejes guías.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Se puede maquinar fácilmente en un CNC- Fácil ajuste manual.	<ul style="list-style-type: none">- Tiempo de fabricación.- Se complica un poco el desarme de sus componentes.

<ul style="list-style-type: none"> - Se puede sujetar muestras circulares con pernos Allen en la cara superior de la mordaza. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere más elementos.
--	---

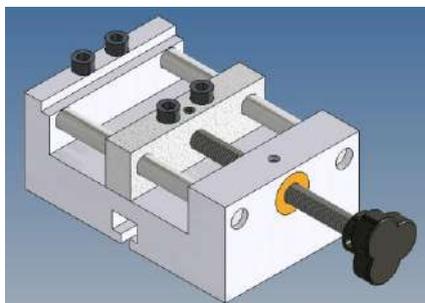


Figura 37. Mordaza con ejes guías
(Fuente: Propia)

Inclinar la muestra.

Como se vio en trabajos acerca del equipo es necesario que las muestras se ensayen con un ángulo de 30 a 60 °, por lo cual la base donde se asienta la mordaza debe tener esta capacidad de graduarse angularmente, para lo cual solo existe una solución viable.

Base inclinable para la mordaza.

Tabla 26. Características de la base inclinable para la mordaza.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se puede maquinar fácilmente en un CNC - Fácil de graduar manual. - El encañalado en el centro no solo permite sujeción mecánica con la mordaza, sino que además, permite desplazar la mordaza hacia arriba y abajo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere precisión para perforación del agujero por donde pasa el eje de sujeción.

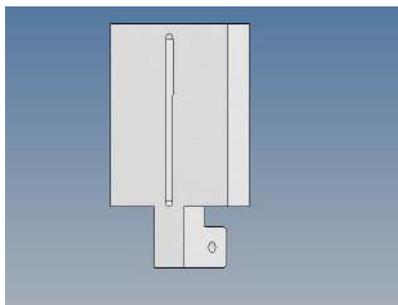


Figura 38. Base inclinable para la mordaza
(Fuente: Propia)

Definir sistema de movimiento transversal.

Debido a que en el módulo 3 se definió un movimiento horizontal para el motor, el cual está conectado al eje, partiendo de esa línea de acción se busca un movimiento perpendicular al eje, debido a que la muestra requerirá acercarse o alejarse del eje dependiendo del diámetro de la esfera de acero que se vaya a emplear, por este motivo, la función requiere de un desplazamiento de la base de sujeción de la mordaza y se plantea dos alternativas para ello.

Base con acanalado en forma de T

Tabla 27. Características del base con acanalado en forma de T.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se puede maquinar fácilmente en un CNC - Una base desmontable de cuatro componentes. - Se puede fabricar usando la misma fresa en todo el proceso de mecanizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere otros elementos de sujeción mecánica para ensamblar las partes.

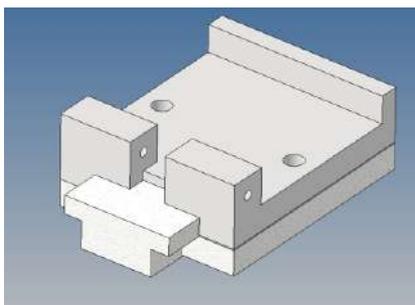


Figura 39. Base con acanalado en forma de T
(Fuente: Propia)

Base con cola de milano.

Tabla 28. Características del base con cola de milano.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se puede maquinar fácilmente en un CNC - Su base se conforma de dos componentes. - La altura de su base se puede hacer pequeña, dejando usar mas material para reforzar la base superior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere de una fresa cola de milano para su maquinación, caso contrario no existe forma de mecanizar la base.

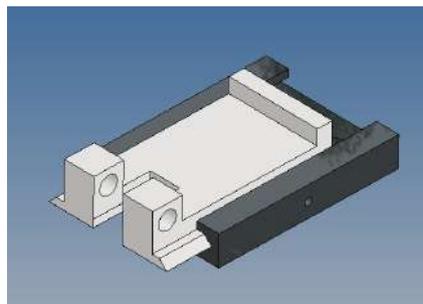
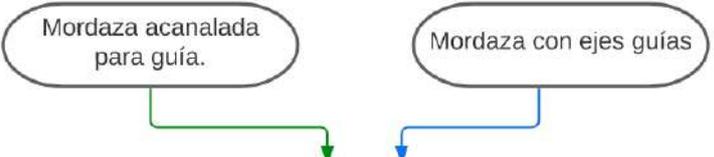
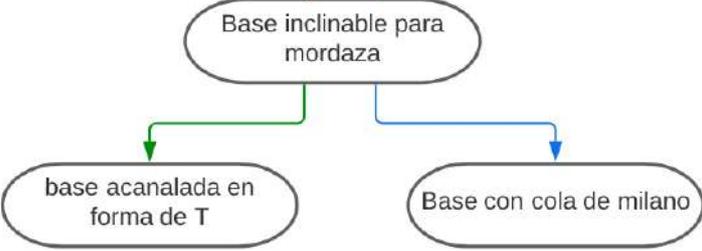


Figura 40. Base cola de milano
(Fuente: Propia)

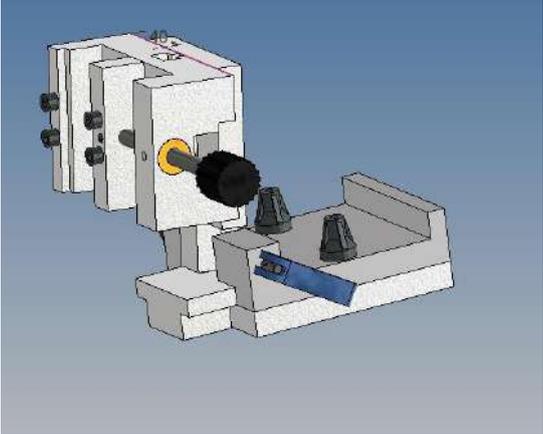
Opiones para las soluciones del módulo 4

Tabla 29. Alternativas de solución para el módulo 4

Función	Componente
Sujetar muestra	
Inclinar muestra	
Definir sistema de movimiento transversal	
Alternativa	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Alternativa 1 Alternativa 2 </div>

Alternativa 1 para el modelo 4.

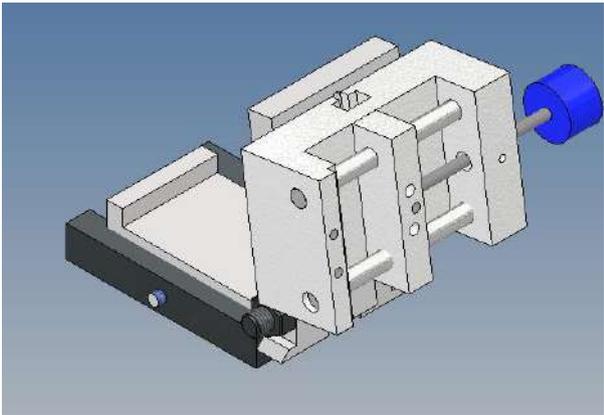
Tabla 30. Desventajas y ventajas de la alternativa 1 del módulo 4

Sujeción y movimientos de la muestra	Modelo 1
<p data-bbox="264 1637 373 1671">Ventaja</p> <p data-bbox="421 1290 703 2024">La unión mecánica entre en la base inclinable y la base de desplazamiento transversal se puede realizar con un eje pequeño, siempre y cuando sea fabrique con un material dúctil. Todos los componentes son fáciles de ajustar a la medida que se desea.</p>	 <p data-bbox="863 1921 1310 2007">Figura 41. Alternativa 1 módulo 4. (Fuente: Propia)</p>

desventaja	Se requiere una forma de unión entre la base en forma de T y sus guías de tal manera que al ajustar se logre la presión suficiente para que no se mueva la base.	
-------------------	--	--

Alternativa 2 para el modelo 4.

Tabla 31. Ventajas y desventajas de la alternativa 2 del modelo 4

Sujeción y movimientos de la muestra		Modelo 1
Ventaja	La cola de milano proporciona un desplazamiento suave a la mordaza y el ajuste se puede realizar con dos pernos cabeza de Allen en los lados, el eje donde se tiene el pivote se puede poner un perno-eje como pasante entre los dos elementos. Se tiene menos componentes.	
desventaja	Se dificulta el desarme de la mordaza para un futuro mantenimiento, el eje es relativamente grande para los esfuerzos a los que se va a someter.	<p>Figura 42. Alternativa 2 módulo 4. (Fuente: Propia)</p>

2 3. Revisión de posibles soluciones

Una vez establecido posibles alternativas para cada uno de los módulos, se prosigue a evaluar cada una de ellas, por medio del método OCCP, en la cual se asigna un valor, ver Tabla 32, a cada solución encontrada en los distintos módulos, con la finalidad de escoger tomar una decisión las alternativas es la más idónea para cada módulo.

Tabla 32. Valores de residuos ponderados

Valor	Descripción
1	Cuando los criterios de columna son menores a los de fila.
0,5	Cuando el criterio de la columna y fila son iguales
0	Cuando el criterio de la columna es mayor al de la fila

Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del primer módulo.

Como se evidencio en la Tabla 8, solo se tuvo una única alternativa por petición del cliente para almacenar el hardware del instrumento calo test, por lo cual la solución definitiva para este módulo es la que se aprecia en la Figura 43.

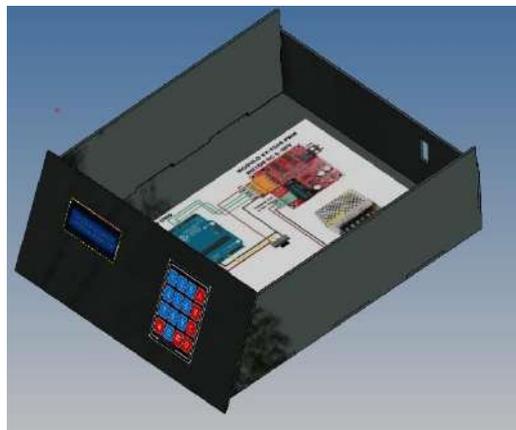


Figura 43. Alternativa seleccionada para el módulo 1
(Fuente: Propia)

Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del segundo módulo.

Para el módulo los criterios de evaluación son:

- RPM

- Fuerza de fricción.
- Facilidad de fabricación.
- Mantenimiento.

De acuerdo con la evaluación de cada criterio indicado en el Anexos II, se llega al siguiente resultado como la solución del módulo 2.

Tabla 33. Conclusión para las alternativas del módulo 2.

Conclusión	RPM	F. fricción	Facilidad de fabricación	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,1373	0,0875	0,1094	0,042	0,376	1
Alternativa 2	0,0588	0,0625	0,0467	0,042	0,21	3
Alternativa 3	0,0784	0,05	0,0469	0,042	0,217	2
Alternativa 4	0,0588	0,05	0,0469	0,042	0,197	4

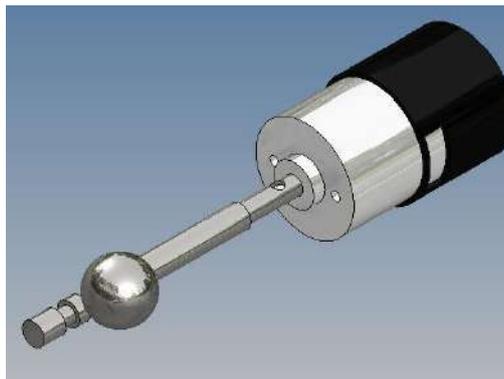


Figura 44. Alternativa seleccionada para el módulo 2
(Fuente: Propia)

Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del tercer módulo

Para el módulo 3 los criterios de evaluación son:

- Desplazamiento.
- Peso.
- Mantenimiento.

De acuerdo con la evaluación de cada criterio indicado en el Anexos III, se llega al siguiente resultado como la solución del módulo 3

Tabla 34. Conclusión para las alternativas del módulo 3

Conclusión	Desplazamiento	Peso	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,296	0,222	0,111	0,63	1
Alternativa 2	0,148	0,111	0,111	0,37	2

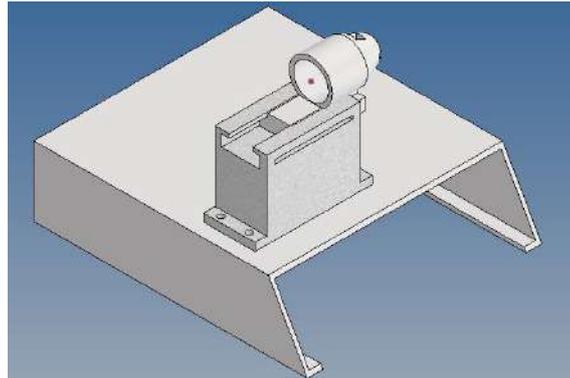


Figura 45. Alternativa seleccionada para el módulo 3.

(Fuente: Propia)

Evaluación de los requisitos para las distintas soluciones del cuarto módulo

Para el módulo 4 los criterios de evaluación son:

- Movilidad.
- Facilidad de fabricación.
- Peso.
- Mantenimiento.

De acuerdo con la evaluación de cada criterio indicado en el Anexos IV, se llega al siguiente resultado como la solución del módulo 4

Tabla 35. Conclusión para las alternativas del módulo 4.

Conclusión	Movilidad	Facilidad de fabricación	peso	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,219	0,167	0,094	0,063	0,542	1
Alternativa 2	0,219	0,083	0,094	0,063	0,458	2

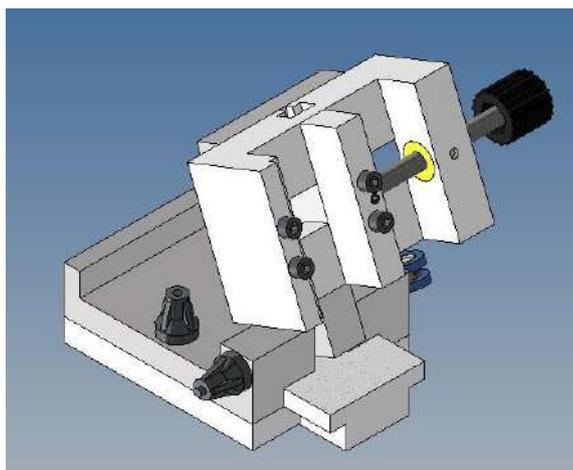


Figura 46. Alternativa seleccionada para el módulo 4
(Fuente: Propia)

2 4. Matriz morfológica

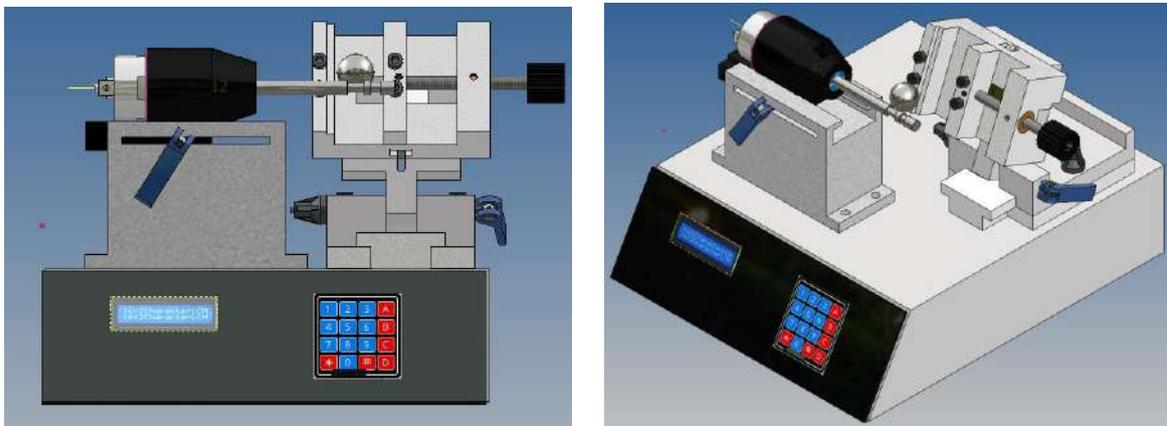
Se presenta las alternativas seleccionadas en la Tabla 36, para cada módulo como resultado del método de OCCP, en ella se obtiene las alternativas ganadoras que representan la solución viable a cada criterio específico de las funciones o tareas establecidas para el funcionamiento principal de generar el cráter en la muestra.

Tabla 36. Matriz morfológica del calo test.

Función Principal	Módulo	Funciones	Alternativas	
Cráter en la muestra	1	almacenar el hardware	Caja de almacenamiento	
		controlar RPM y tiempo	Circuito Arduino UNO	
	2	Convertir energía eléctrica	Motor DC con encoder	Motor DC 775
		Convertir energía cinética rotacional	Eje acanalado para esfera libre	Eje con esfera fija
	3	Definir sistema de movimiento horizontal	Base para motor con acanalado	Base para motor con sujeción articulada
		sujetar elementos	Base del equipo	
		Definir sistema de movimiento transversal	Mordaza acanalada para guía	Mordaza con ejes guías
		inclinarse muestra	Base inclinable para mordaza	
		Sujetar muestras	Base acanalada en forma de T	Base con cola de milano

2 5. Solución virtual

Finalmente, se encuentra la primera solución virtual, como se evidencia en la Figura 47 se ilustra el resultado de las opciones elegidas para cada sección, así como también, los criterios establecidos y las demandas básicas del cliente, en el cual el diseño del calo test, podrá sujetar muestras de diversos tamaños y formas, inclinarse según la angulación que se requiera, desplazarse hacia eje por si se requiere otro cráter en la misma muestra, la base del motor logrará desplazar la distancia que se necesite, aparte de ello, el motor alcanzará altas revoluciones, se buscará realizar todos estos elementos con los materiales más baratos, pero que cuenten con propiedades mecánicas de acorde a su función, esto permitirá abaratar el precio total del equipo. Los detalles y los cambios en la solución virtual se modificarán en base a los inconvenientes que se presenten en la construcción y se representarán en los planos finales.



a)

b)

Figura 47. Solución virtual del calo test propuesto: a) vista frontal; b) vista isométrica

2 6. Diseño mecánico

Potencia requerida del motor

El paso previo para el diseño del eje es saber la potencia que se va a tener del motor, por lo cual se debe realizar un análisis estático donde se busque transmitir el movimiento rotatorio del eje a la esfera, como se contempla en la Figura 48.

Para el procedimiento del cálculo de la potencia del motor se sigue el desarrollo del ejemplo presentado en [29], comenzando por determinar el peso de la esfera para determinar la descomposición de esta fuerza en sus dos ejes, las ecuaciones se detallan a continuación.

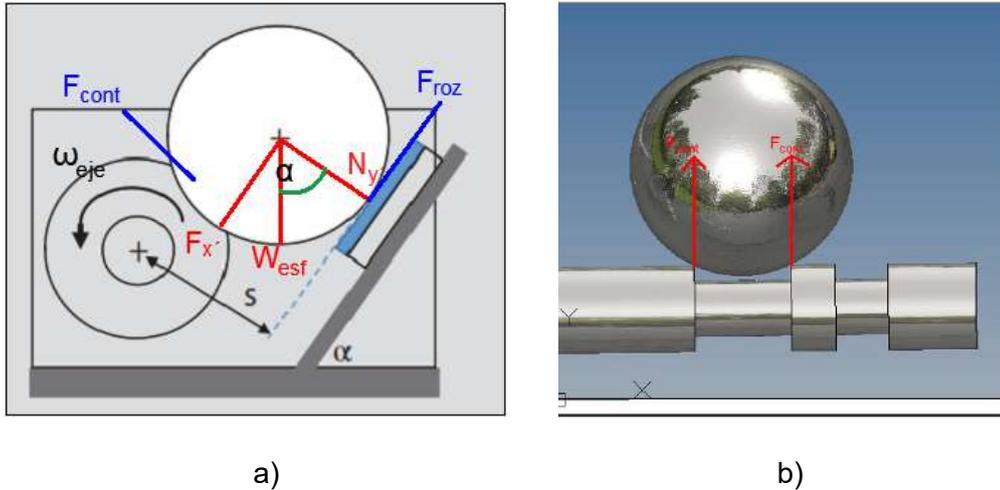


Figura 48. Esquema de transmisión de movimiento de rotación; a) Esquema de cuerpo libre entre la muestra y la esfera; b) Fuerzas de contacto entre el eje y la esfera

(Fuente: Propia)

$$v_{esf} = \frac{4}{3} \left(\frac{D_{esf}}{2} \right)^3$$

Ecuación 12. Volumen de la esfera.

$$m_{esf} = \delta_{esf} * v_{esf}$$

Ecuación 13. Masa de la esfera

$$W_{esf} = m_{esf} * g$$

Ecuación 14. Peso de la esfera

$$N_{y'} = W_{esf} * \cos(\alpha_{critico})$$

Ecuación 15. Fuerza normal en el eje Y'

$$F_{roz} = N_{y'} * \mu_1$$

Ecuación 16. Fuerza rozamiento causado en la muestra

Como se señala en la Figura 49, una vez encontrada la composición del peso de la esfera en el eje X', se puede encontrar la fuerza normal del contacto entre el eje y la esfera, con esto se logra encontrar una de las dos fuerzas de contacto, ver Figura 48 b), para determinar la potencia de contacto que debe tener ambas superficies, aun así, la potencia del motor se determina asumiendo una eficiencia del 98% [29] debido a pérdidas de

energía por el soporte del rodamiento, las ecuaciones de este cálculo se presentan a continuación:

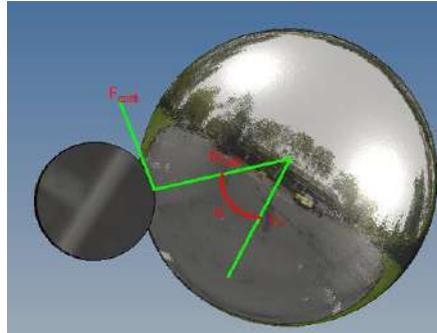


Figura 49. Esquema de cuerpo libre de las fuerzas entre el eje y a esfera.

(Fuente: Propia)

$$F_{x'} = W_{esf} * \sin(\alpha_{critico})$$

Ecuación 17. Componente del peso de la esfera en el eje X'

$$N_{cont} = F_{x'} * \cos(\alpha_{critico})$$

Ecuación 18. Fuerza normal de contacto entre la esfera y el eje

$$F_{cont} = N_{cont} * \mu_2$$

Ecuación 19. Fuerza de contacto entre la esfera y el eje.

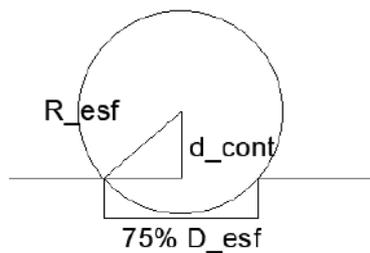


Figura 50. Diagrama de diámetro de contacto de la esfera con los bordes del eje.

(Fuente: Propia)

$$V_{tang} = 2\pi * RPM * d_{cont}$$

Ecuación 20. Velocidad tangencial al punto de contacto

$$d_{cont} = \left(\left(\frac{D_{esf}}{2} \right) - \left(\frac{0,75 * D_{esf}}{2} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 21. Distancia de contacto de la esfera con los bordes del canal del eje

$$P_{cont} = 2 * F_{cont} * V_{tang}$$

Ecuación 22. Potencia de contacto entre las superficies

$$P_{motor} = \frac{P_{cont}}{\eta_{perd}}$$

Ecuación 23. Potencia del motor

Para este caso de estudio las esferas son AISI 52100 100CR6 con diámetros de mayor a menor de 25.4, 20, 15 y 10 mm, respectivamente, para este material la densidad de la esfera es 7,8 g/ cm³ [30], además según describe el autor, se considera $\alpha_{critico} = 45^\circ$, ya que en esta posición se consigue el mayor coeficiente de rozamiento al que podemos suponer igual a 1 [28]. Finalmente, la distancia del acanalado del eje donde se va a apoyar las esferas se recomienda según la norma ISO 26423 debe ser el 75% del diámetro de la esfera, ver la Figura 50. La máxima velocidad de rotación que va a girar el eje, según lo específico al cliente es de 3000 rpm. De acuerdo con lo anterior, se tiene la potencia del motor indicada en la Tabla 37.

Tabla 37. Cálculo para la potencia del motor requerido para una esfera de 1 pulgada de diámetro

Datos	$D_{esf} = 25,4 \text{ mm}$	$\delta_{esf} = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$\mu_1 = 1,0$	$\mu_2 = 1,0$	$\alpha_{critico} = 45^\circ$
Variable	Valor	Variable	Valor	Variable	Valor
V_{esf}	8,580 cm ³	F_{roz}	0,464 N	d_{cont}	8,4 mm
m_{esf}	0,0669 kg	$F_{x'}$	0,465 N	V_{tang}	2,81 m/s
W_{esf}	0,657 N	N_{cont}	0,3285 N	P_{cont}	2,13 W
$N_{y'}$	0,464 N	F_{cont}	0,3285 N	P_{motor}	2,18 W

Con una potencia requerida de 2,18 W para girar a 3000 rpm una esfera de 25,4 mm se busca en catálogos y como se ve en el ... del Anexos V. Encontramos el modelo RS 775 con una potencia de salida de 7,7 W, velocidad de giro con carga de 2220 rpm, un torque de 0,334 N-m y el motor tiene un eje de 5 mm de diámetro.

Cálculo de los canales del eje.

Como se observó en la Figura 50, la longitud del canal debe ser 75% del diámetro de cada esfera, la altura de la esfera que queda dentro del canal se determina con la Ecuación 24.

$$h_{canal} = R_{esf} - d_{cont}$$

Ecuación 24. Altura del canal

Donde al valor encontrado se suma una distancia prudente para garantizar que la esfera se apoye en los bordes del canal y no hasta la base, el largo y ancho del canal para cada una de las esferas muestra en la Tabla 38

Tabla 38. Dimensiones de los canales para cada esfera

Diámetro	25,3 mm	20 mm	15 mm	10 mm
Dimensiones del canal				
longitud [mm]	19	15	11	7
ancho [mm]	5	4	3	2

Para evitar concentradores de esfuerzos al realizar canales rectos, como se ve a la derecha de la Figura 51, se puede realizar una angulación a 45° donde los catetos del triángulo rectángulo tienen el mismo ancho indicado en la Tabla 38, al tratar de ubicar las esferas de mayor a menor desde la izquierda del eje hacia la derecha, se podrá imaginar que el diámetro del eje en cada canal ira de un diámetro menor a uno mayor, lo que podría presentar un problema de diseño, así que, esto se soluciona al usar un ancho de canal de 5 mm para cada esfera. En consecuencia, el nuevo triángulo rectángulo, para evitar los concentradores de esfuerzos, tendrán un cateto de 5 mm y el otro del ancho calculado previamente.

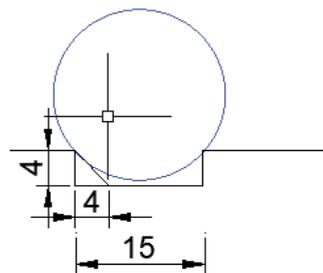


Figura 51. Dimensiones del canal de la esfera de 20 mm
(Fuente: Propia)

El resultado de este cambio tendremos un diámetro constante en cada canal como se muestra en la Figura 52 b), donde cada esfera tendrá un triángulo rectángulo con distintas inclinaciones tal como se contempla en la Figura 52 a).

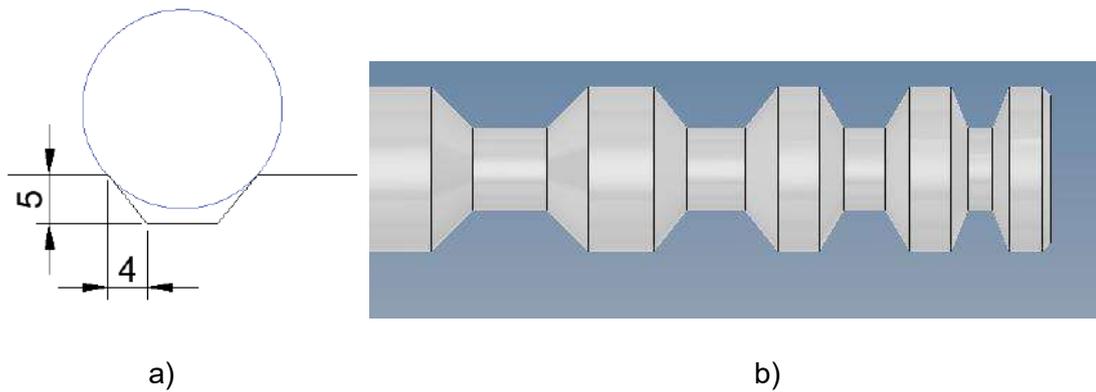


Figura 52. Modificación al canal; a) esfera de 20 mm; b) diseño preliminar del canal para cada esfera a menor.

(Fuente: Propia)

Diseño del eje del motor

El diseño del eje debe contar con un diámetro que sea capaz de soportar las cargas axiales causadas por el resultado del contacto de las esferas en cada canal, la máxima fuerza que de contacto que experimentará el eje será debido a la esfera de 1 pulgada, este eje tendrá un soporte debido a la ubicación del rodamiento en el case del motor, el eje diseñado se unirá al eje del motor, por lo cual se asumirá el punto de contacto como un soporte similar al rodamiento, solo permite rotación pero no desplazamiento, ver Figura 53, el eje trabará a revoluciones fluctuantes, que se estabilizarán en un periodo muy corto, aun así, se usará el criterio de falla a la fatiga de ASME para aceros dúctiles, para determinar su diámetro usando la Ecuación 25. Usando para este diseño sometido a cargas dinámicas un factor de seguridad igual a 2 [31]. El material del eje que se usará es un acero de transmisión conocido también como AISI 1018 laminado en frío por su facilidad de maquinabilidad, dureza superficial con el centro suave, en la Tabla 39 se muestran las propiedades del material.

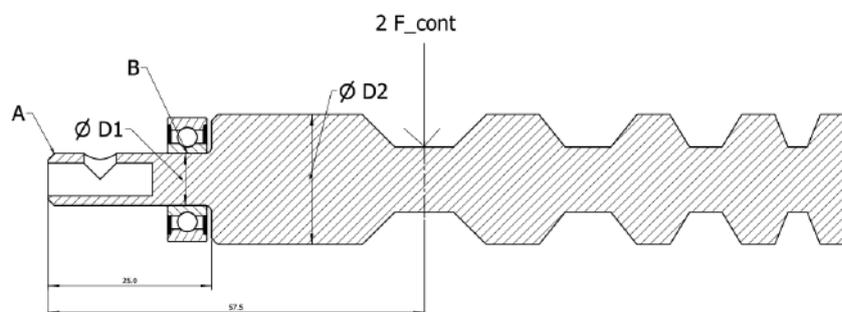


Figura 53. Esquema del soporte y cargas en el eje.

(Fuente: Propia)

$$D = \left(\frac{32 * n}{\pi} * \sqrt{4 \left(\frac{k_t M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{ts} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_t M_m}{S_{yt}} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{ts} T_m}{S_{yt}} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 25. Diámetro para elementos sometidos a fatiga a criterio de ASME [32]

Donde:

n = Factor de seguridad.

k_t = Concentrador de esfuerzos a fatiga por flexión de materiales dúctiles.

M_a = Momento de flexión alterno [N-m].

S_e = Límite modificado de la resistencia a la fatiga [Mpa].

k_{ts} = Concentrador de esfuerzos a fatiga por torsión de materiales dúctiles.

T_a = Par torsor alterno [N-m].

M_m = Momento de flexión medio [N-m].

S_{yt} = Resistencia a la fluencia [Mpa].

T_m = Par torsor medio [N-m].

$$s_e = 0,5 s_{ut} K_a K_b K_c K_d K_e K_f$$

Ecuación 26. Límite modificado de la resistencia a la fatiga [31]

Donde:

S_{yt} = Esfuerzo último del material [Mpa].

k_a = Modificación de factor debido a factores superficiales.

k_b = Modificación de factor debido al tamaño.

k_c = Modificación de factor debido a la carga.

k_d = Modificación de factor debido a la temperatura

k_e = Modificación de factor debido a la confiabilidad.

k_f = Modificación de factor debido a otros efectos.

$$k_a = a s_{ut}^b$$

Ecuación 27. Factor debido a condiciones superficiales [31]

Donde:

a, b = factor y exponente, respectivamente debido a maquinado superficial.

Tabla 39. Propiedades mecánicas y físicas del AISI 1018 [33]

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
<i>Esfuerzo de fluencia</i>	s_{yt}	370 Mpa (44Kpsi)
<i>Esfuerzo último</i>	s_{ut}	440 Mpa (53Kpsi)
	<i>Dureza</i>	126 HB (71 HRb)
	<i>Elongación máxima</i>	15% (en 50mm)
<i>módulo de elasticidad</i>	E	205 Gpa
<i>módulo de rigidez</i>	G	80,8 Gpa
<i>Densidad del material</i>	ρ	7m87 g/cm ³

Cálculo de reacciones en el eje.

De acuerdo con la Figura 53, las reacciones en los puntos A y B se dan en un solo eje ya que la carga es perpendicular al eje, ver Figura 49, por ende, se tiene que:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{yA} + R_{yB} + 0,66 N$$

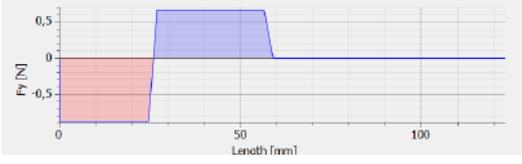
$$\sum M_A = 0$$

$$R_{yB}(25mm) = 0,66N(58mm)$$

$$R_{yB} = 1,531N ; \quad R_{yA} = -0,871N$$

Tabla 40. Diagrama cortante y flector en el plano YZ

Diagramas	Valores
 <p>El diagrama muestra un eje horizontal con dos apoyos, A y B. Un par torsor se aplica en el extremo izquierdo del eje. Una fuerza perpendicular, etiquetada como 'Force:1', se aplica hacia abajo en un punto entre los apoyos A y B.</p>	

Diagrama de cargas en el plano	
 <p>Diagrama cortante</p>	$R_{YA} = -0,871 N$ $R_{yB} = 1,531 N$
 <p>Diagrama de momento flector</p>	$M_x máx = -21,43 N - mm$
$T_{mz máx} = 33,4 N - mm$	

En la Tabla 41 se presentan todos los parámetros que se requieren para determinar el diámetro del eje, los valores M_a y T_m son de 21,43 y 33,4 3 N mm, respectivamente, se considera a $M_m = T_a = 0$ N-mm. Se espera usar un rodamiento de 8 mm de diámetro interno y el diámetro externo de 19 mm, para tener un espacio suficiente de atornillar el case al motor, por lo cual el catálogo de SKF indica que el radio del giro para asentar ese rodamiento es de 0,3 mm, ver Figura 76, conociendo el radio de giro y el diámetro D_1 , se considera un factor teórico de concentradores de esfuerzos para flexión y torsión de 2,6 y 2,2, respectivamente.

Para el valor de K_b se espera se esté dentro del rango $2,79 < d < 51$ y se toma un valor diámetro teórico de 20 mm, el k_e se asume una confiabilidad del 90 %, Este sería el diámetro más pequeño con el que podría construirse el eje para soportar las cargas provocadas por la fricción de la esfera de 1 pulgada, aun así, se sobre dimensiona este valor encontrado, debido a que, se va a conectar con el eje del motor con un diámetro de 5 mm, ver Figura 70, este cambio implicaría el hecho de reiterar los parámetros anteriores con este nuevo diámetro, aumentando también el valor del factor de seguridad.

Por otro lado, para el diámetro D_2 se debe tener en cuenta las profundidades de 5 mm de los canales del eje, así pues, se considera un diámetro de 20 mm, para que el diámetro interno quede de 10 mm.

Tabla 41. Parámetros para el cálculo del diámetro del eje.

Parámetro	Valor	Ecuación/Figura
a	4,51	Figura 71
b	-0,265	Figura 71
k_a	0,92	Ecuación 27
k_b	0,99	Figura 72
k_c	1	Figura 73
k_d	1	Figura 74
k_e	0,87	Figura 75
k_f	1	Se asume
s_e	175,7 Mpa	Ecuación 26
D	2,5 mm	Ecuación 25

Ajustes rodamiento – eje

Para el ajuste que debe existir entre el rodamiento y el eje, se consultara las recomendaciones tanto del fabricante como de otros autores. En este caso, es necesario un ajuste tipo apriete, con el sistema de agujero único debido a que el rodamiento manda, ya que el eje se puede mecanizar fácilmente. Tal como se aprecia en la Figura 77, se recomienda para ejes de motor un H7/n6, por lo que el ajuste se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 42. Ajuste para el rodamiento

8 H7/n6	Agujero	Eje
Es/es	0,015	0,019
EI/ei	0	0,01
T/t	0,015	0,009
DM/dM	8,015	8,019
Dm/dm	8	8,01
Ajuste	Indeterminado	
JM	0,005	
AM	0,019	

Es= Desviación superior del agujero; **es**= Desviación superior del eje; **EI**= Desviación inferior del agujero; **ei**= desviación inferior del eje; **T**= tolerancia del agujero; **t**= tolerancia del eje; **DM**= Diámetro máximo del agujero; **dm** = Diámetro máximo del eje; **Dm**= Diámetro mínimo del agujero; **dm** = Diámetro mínimo del eje; **JM**= Juego máximo; **AM**= apriete máximo.

Simulaciones.

Obtenidas las geometrías y las cargas que van a actuar sobre los distintos elementos se prosiguen a simular los resultados usando INVENTOR, en la opción de análisis de esfuerzos, en la cual se observará el comportamiento del esfuerzo de Von Misses, el cual está basado en el criterio de la máxima energía de distorsión, que garantiza la seguridad estructural del componente siempre que el máximo valor encontrado sea menor al límite a la fluencia del material [34].

Eje del motor.

En las Figura 54 a) y b) se indica el esfuerzo de Von Misses como el factor de seguridad, respetivamente, se observa que el máximo esfuerzo alcanzado es inferior al límite al esfuerzo de fluencia del acero 1018, además, no existe zonas en la que el factor de seguridad sea menor a 1, lo cual se demuestra la efectividad del diseño y el material seleccionados.

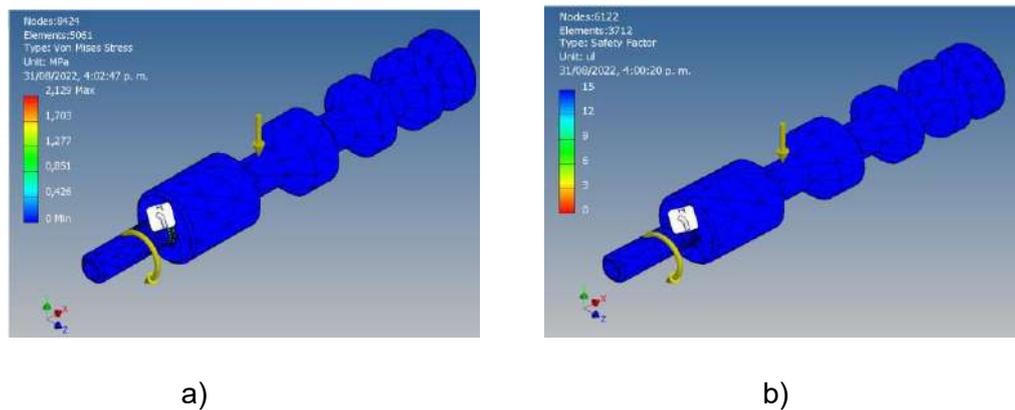


Figura 54. Simulación del eje del motor; a) Esfuerzo de Von Misses; b) Factor de seguridad.

(Fuente: propia)

Base del equipo

La carga aplicada a la base del equipo será el peso total de todos los componentes superiores los cuales se especifican en la Tabla 43, las cuales se tomaron de pesar sus componentes en la balanza 22 ADAM.

Tabla 43. Pesos de los componentes (prensa y motor)

<i>Parte</i>	<i>Peso [gf]</i>	<i>Peso [N]</i>
<i>Mordaza y base inclinable</i>	609,7	5,98
<i>Base de desplazamiento</i>	528,4	5,18
<i>Base de motor</i>	524,4	5,14
<i>Motor +case</i>	390	3,82
<i>Total</i>	1528,1	20,12

El material de esta base es una plancha de acero comercializada con el nombre de tool negro, calidad A 36, las propiedades de este material se indica en la Tabla 44.

En la Figura 55, se indica que el esfuerzo de Von Misses es inferior al esfuerzo de fluencia del material y este se ve reflejado en el factor de seguridad.

Tabla 44. Propiedades mecánicas del acero A36 [34]

<i>Propiedad</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
<i>Esfuerzo de fluencia</i>	S_{yt}	36 ksi (248 Mpa)
<i>Esfuerzo último</i>	S_{ut}	58 Ksi (399 Mpa)

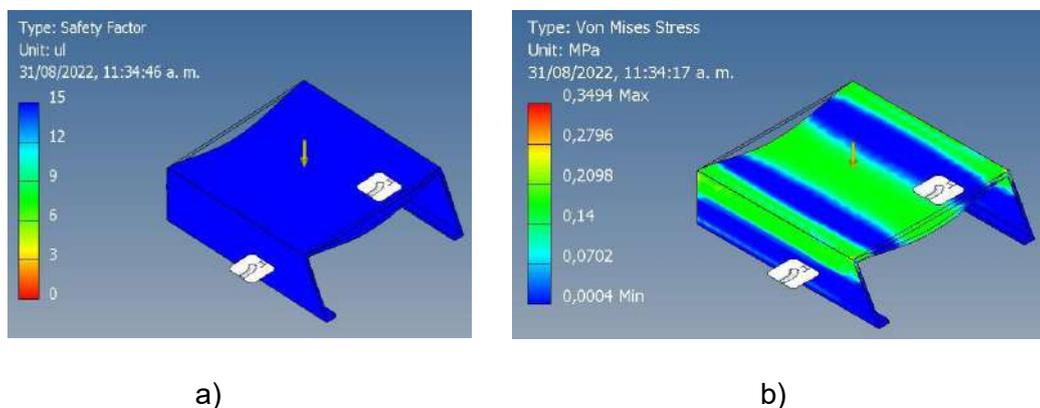


Figura 55. Simulación de la base del equipo; a) Factor de seguridad; b) Esfuerzo de Von Misses

(Fuente: propia)

Eje de ajuste rápido de la base inclinable

Este es un eje típico usado en las llantas de bicicletas, el cual se adaptó como ajuste de la base inclinable, así se logra un ajuste rápido una vez que se ubique la mordaza a los grados deseados. Este eje se encuentra comercialmente en el mercado y está hecho de hierro fundido gris, este eje debe soportar el pivote del peso de la mordaza y la base inclinable indicada en la Tabla 43.

En la Figura 57 a) el esfuerzo máximo es menor al de fluencia que es de 121 Mpa [33], se ve que el desplazamiento insignificante, por lo cual se ve que este tipo de eje de ajuste rápido es efectivo para soportar el peso de la mordaza y su base.

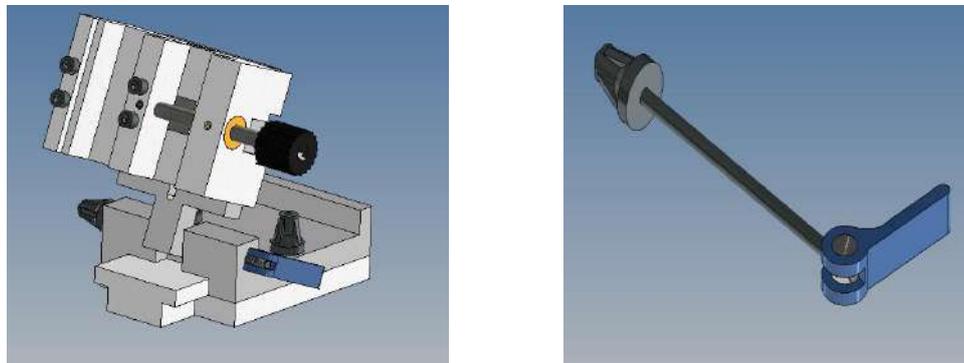


Figura 56. Ubicación del eje de ajuste rápido
(Fuente: propia)

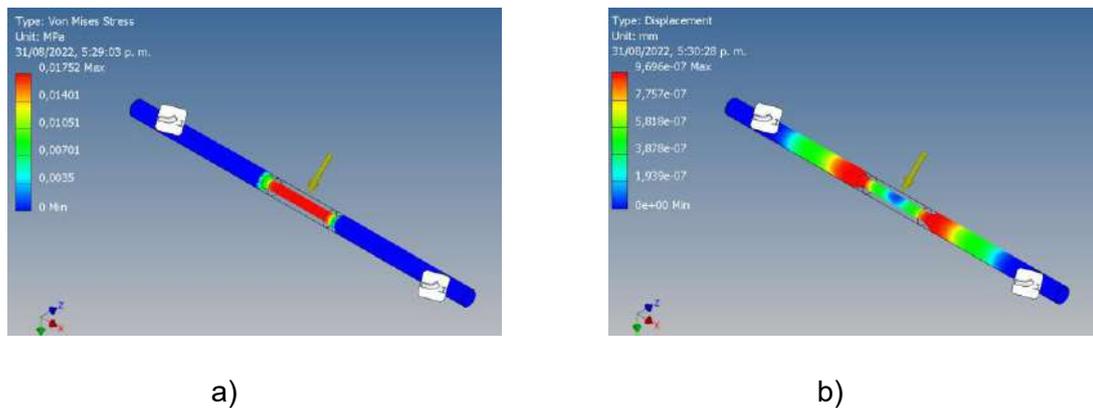


Figura 57. simulación del eje de ajuste rápido; a) Esfuerzos de Von Misses; b) desplazamiento.
(Fuente: propia)

Base movimiento transversal

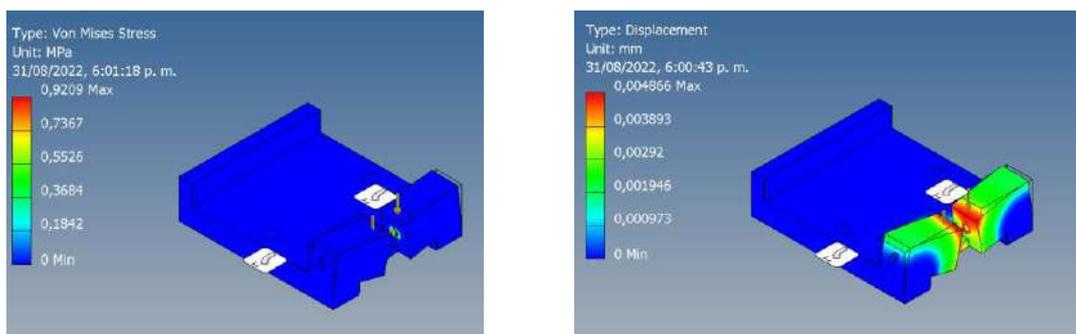
Tanto la base del motor como las bases donde se van a ajustar las muestras se van a fabricar con duralón, un material termoplástico de la familia UHMW 1900, el cual se basa de

polietileno de alta densidad [35], muy empleado en la industria debido a su facilidad de maquinabilidad y su buena resistencia a cargas de trabajo, las propiedades del material se detallan en la Tabla 45.

Tabla 45. Propiedades del duralón [35].

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
<i>Resistencia a la tracción</i>	[2500-3500] psi [17,23-24,13] Mpa
<i>Resistencia a la compresión</i>	2400 psi [16,5 Mpa]
<i>Resistencia a la flexión</i>	1000 psi [6,9 Mpa]
<i>Gravedad específica</i>	0,94

En la Figura 58, se ve que el esfuerzo máximo que se alcanza es inferior al de fluencia del duralón y el desplazamiento es casi despreciable, por lo cual vemos que el material es muy apto para la construcción de las distintas partes que tendrá el equipo.



a)

b)

Figura 58. Simulación de la base de movimiento transversal; a) Esfuerzo de Von Misses; b) desplazamientos

(Fuente: propia)

Siendo estos cuatro elementos los más críticos que se encontraron en el dispositivo calo test.

los planos del equipo se detallan en el Anexos VII.

2 7. Construcción del equipo Calotest.

Para la construcción del dispositivo, se usó las instalaciones, máquinas y herramientas de la Escuela Politécnica Nacional para la fabricación de la mayoría de las piezas.

A continuación, se detallan las herramientas y equipos usadas en el Laboratorio de Máquinas y herramientas (**LMH**):

Torno paralelo Torrent.

Centro de mecanizado ROMI D8000.

Cuchillas acero rápido HSS.

Fresas planas.

Sierra.

Lijas.

Machuelos.

Los procesos de mecanizado que se siguió para cada pieza se especifican en las hojas de procesos especificadas en los Anexos VIII.

3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Pruebas

En las primeras pruebas se deben determinar los siguientes parámetros esenciales para generar los micro cráteres en las muestras y lograr determinar el espesor y la tasa de resistencia al desgaste que tiene el recubrimiento.

- Distancia del eje a la muestra.
- Inclinação de la muestra.
- RPM
- Tiempo

Para el análisis de estos parámetros, se consiguieron dos muestras en la Empresa CARMET INGENIERÍA APLICADA.

Las muestras son dos ejes de acero UNI C50, cada un largo de 80 mm y con un diámetro de 25,4 mm de las cuales por medio de electrodeposición se aplica un recubrimiento de

cromado, el cual varia su espesor según la demanda del cliente. Se obtuvieron de un lote de barras de acero cromadas de las cuales tienen espesores que varían desde las 20-50 μm .

Con el objetivo de medir el espesor del recubrimiento usando la Ecuación 5 por medio de la generación de la calota o micro cráter en la muestra, se señala 9 puntos repartidos en distintas partes de la periferia del eje, tal como se señala Figura 59.

Se utilizan dos medidores ultrasónicos digitales para comparar los resultados producidos por el equipo. Las características técnicas se detallan en el Anexos IX.



Figura 59. Ubicación de los puntos a ensayar.

(Fuente: propia)

Debido a la poca información sobre las revoluciones, tiempo, inclinación y distancia correcta de la esfera a la muestra, tipo y concentración de líquido abrasivo que se debe aplicar para recubrimientos de cromado y poder comenzar con la generación de cráteres en las muestras, se inició primero con una serie de ensayos de prueba para lograr determinar los parámetros más apropiados, de manera que, se puede lograr un desbaste preciso y llegar al material base, tal como se indica en la siguientes imágenes y en el Anexos X.



Figura 60. Pruebas de operación.

(Fuente: propia)

Una vez obtenidos los micro cráteres, se procede a llevar al laboratorio de metalografía Desgaste y Falla (**LMDF**), para tomar fotografías de los 18 cráteres usando el microscopio estéreo SZXY Olympus del laboratorio, llegado a este punto, se hará uso del Software IMAGE J, tomar las medidas **X** y **Y** como se indicó en la Figura 11.

3.2. Resultados

Después de una serie de intentos, se logra dar con los siguientes valores operacionales, los cuales, para este tipo de recubrimiento en específico, se logra generar los micro cráteres esperados.

Tabla 46. Parámetros para generación de micro cráteres en recubrimiento de cromado

RPM	t (s)	S (mm)	α	Líquido abrasivo 1 gota cada 10 s
3000	540	11	45°	Alúmina de 1 μm suspendida en agua destilada en una relación de 4 % Al_2O_3 y 80% H_2O

t = tiempo de ensayo; **S** = distancia del eje a la muestra; **α** = ángulo de inclinación de las muestras

Usando el medidor INSIZE se mide el espesor del recubrimiento en los 9 puntos en cada muestra, los resultados se aprecian en la

Tabla 47. Espesores en las muestras A y B con el equipo INSIZE

INSIZE	Espesor [μm]		Estadísticas		
	Muestra A	Muestra B		Muestra A	Muestra B
	31,5	29,5			
	26,3	31,6	# lecturas	9	9
	26	28,8	\bar{x}	32,23	33,16
	30,3	28,7	Máximo	42,5	38,8
	28,3	35,8	Mínimo	26	28,7
	33	38,8	σ	5,65	3,69
	32,5	35,1	$\bar{x} + 3\sigma$	49,2	44,25
	39,7	33,6	$\bar{x} - 3\sigma$	15,2	22,07
	42,5	36,6	CV	17,5 %	11,1 %

\bar{x} = valor promedio de los datos; σ = desviación estándar; **C.V** = coeficiente de variación

En la Tabla 48 y la Tabla 49 A continuación se exponen los resultados empíricos por el dispositivo Calotest. Usando del Software IMAGE J se consigue medir las distancias X y Y para cada uno de los micro cráteres obtenidos en el equipo, tal como se muestra en la Figura 61 los resultados de cada cráter se indica en el Anexos XI

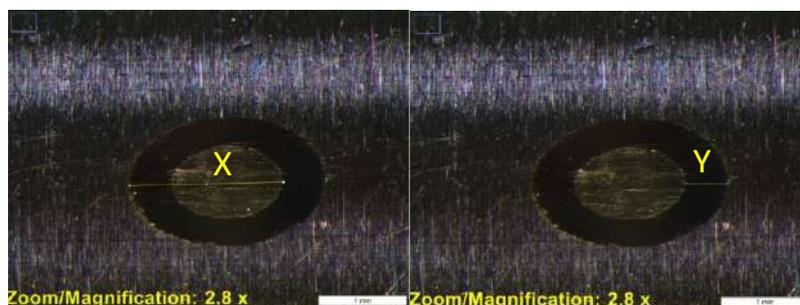


Figura 61. Cráter generado por el equipo Calotest
(Fuente: propia)

Tabla 48. Espesor de la muestra A con el equipo Calotest.

Punto	X	Y	diámetro esfera (mm)	espesor (mm)	espesor (μm)
1	1,783	0,496	25,4	0,0348176	34,82
2	1,806	0,479	25,4	0,034058	34,06
3	1,619	0,574	25,4	0,0365869	36,59
4	1,919	0,488	25,4	0,036869	36,87
5	1,596	0,612	25,4	0,0384548	38,45
6	1,565	0,607	25,4	0,0373998	37,40
7	1,646	0,653	25,4	0,0423165	42,32

8	1,562	0,712	25,4	0,0437852	43,79
9	1,607	0,7	25,4	0,0442874	44,29

Tabla 49. Espesor de la muestra B con el equipo Calotest

Punto	X	Y	diámetro esfera (mm)	espesor (mm)	espesor (μm)
1	1,578	0,528	25,4	0,0328025	32,80
2	1,236	0,642	25,4	0,0312406	31,24
3	1,435	0,581	25,4	0,0328242	32,82
4	1,506	0,531	25,4	0,0314837	31,48
5	1,596	0,587	25,4	0,0368839	36,88
6	1,508	0,621	25,4	0,0368688	36,87
7	1,471	0,703	25,4	0,0407131	40,71
8	1,519	0,691	25,4	0,041324	41,32
9	1,506	0,607	25,4	0,0359898	35,99

Se puede observar que el espesor de las muestras ensayadas está en el rango de $30 \leq t \leq 50$ micras. Se realizó un análisis más comparativo usando un segundo medidor de espesores del laboratorio de la marca ELCOMETER, una vez seteado el equipo en el rango de 20 a 50 micras para lograr mediciones más precisas, se selecciona al azar tres micro cráteres y se toma 4 mediciones cerca a cada uno de ellos, los valores obtenidos se indican a continuación. El informe de resultados se indica en el Anexos XIII.

Tabla 50. Espesores en las muestras A y B con el equipo ELCOMETER

	Espesor [μm]		Estadísticas		
	Muestra A	Muestra B		Muestra A	Muestra B
ELCOMETER	47,8	49,5	# lecturas	12	12
	48,9	46,7	\bar{x}	45,36	43,51
	49,6	48,9	Máximo	49,6	49,5
	48,1	43,8	Mínimo	39,3	38,3
	46,6	44,5	σ	3,9	4,05
	46,4	44	$\bar{x} + 3\sigma$	57,07	55,68
	47,1	44,3	$\bar{x} - 3\sigma$	33,66	31,35
	48,8	46,1	CV	8,6	9,3
	40,9	38,4			
	39,7	38,3			
	39,3	38,4			
	41,2	39,3			

\bar{x} = valor promedio de los datos; σ = desviación estándar; **C.V** = coeficiente de variación
 Para procesar los datos con la mayor facilidad posible se utiliza el programa estadístico SPSS de IBM.

Histograma del equipo Calotest para la muestra A

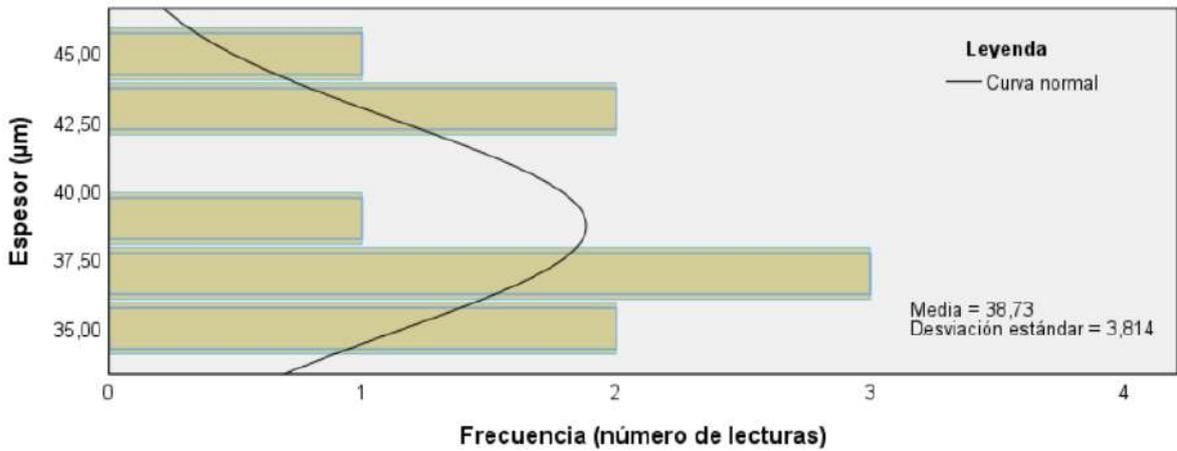


Figura 62. Gráfica de frecuencia de la muestra A en el equipo Calotest [36]

Histograma del equipo Calotest para la muestra B

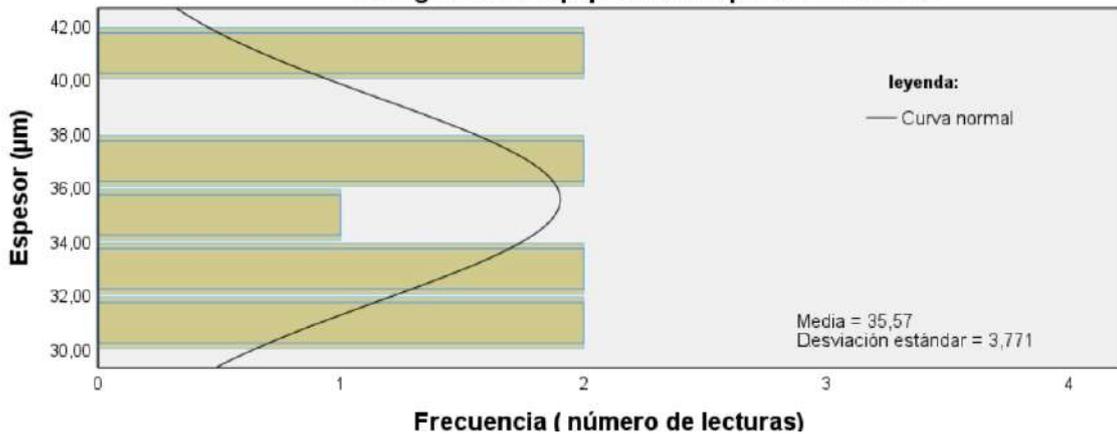


Figura 63. Gráfica de frecuencia de la muestra B en el equipo Calotest [36]

Histograma con el equipo ELCOMETER para la muestra A

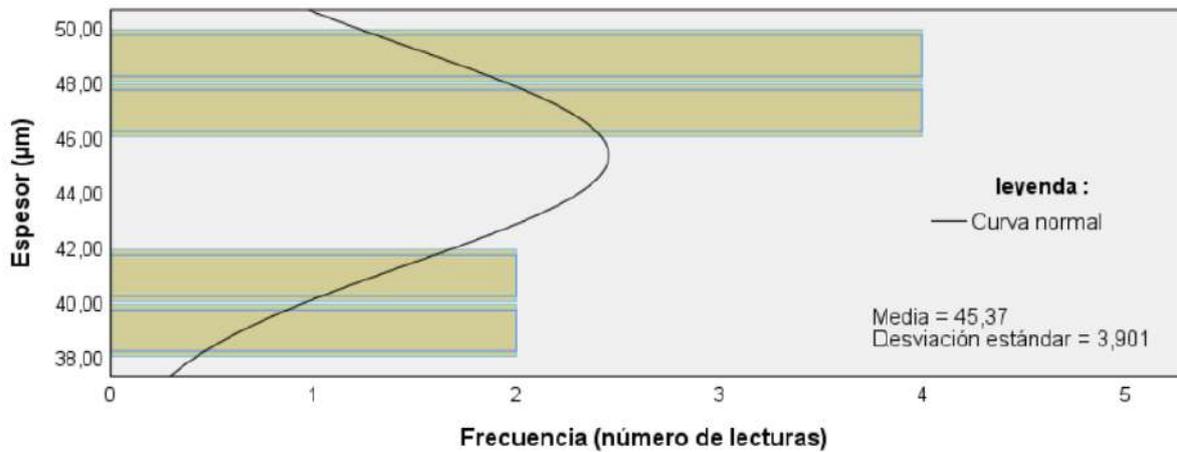


Figura 64. Gráfica de frecuencia de la muestra A en el equipo ELCOMETER [36]

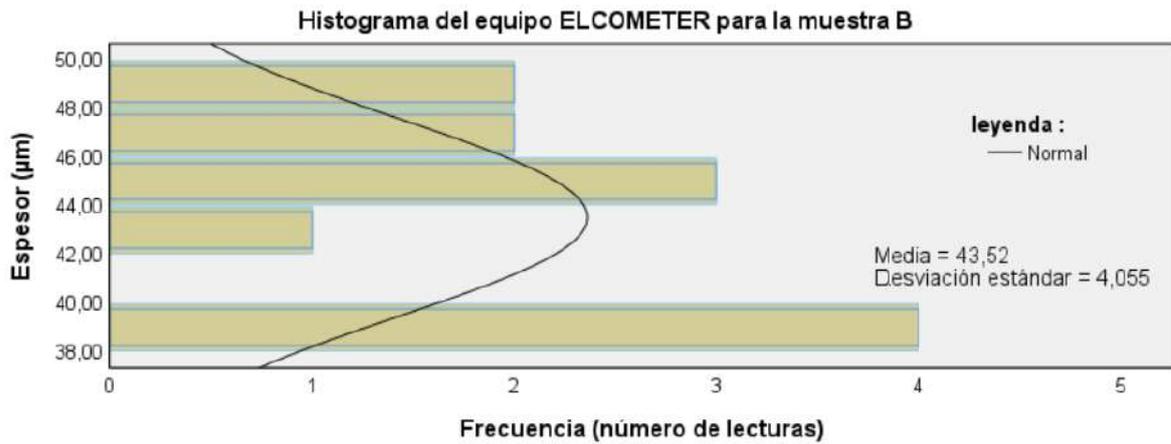


Figura 65. Gráfica de frecuencia de la muestra B en el equipo ELCOMETER [36]

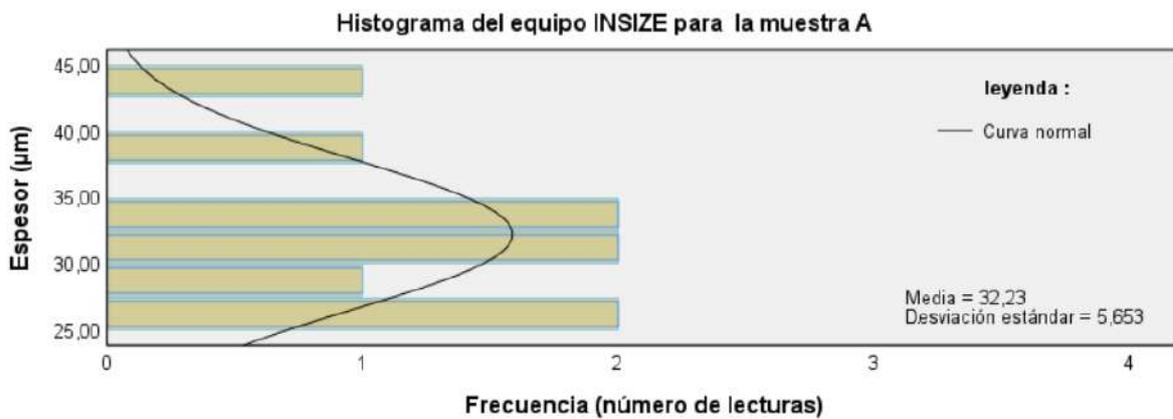


Figura 66. Gráfica de frecuencia de la muestra A en el equipo INSIZE [36]

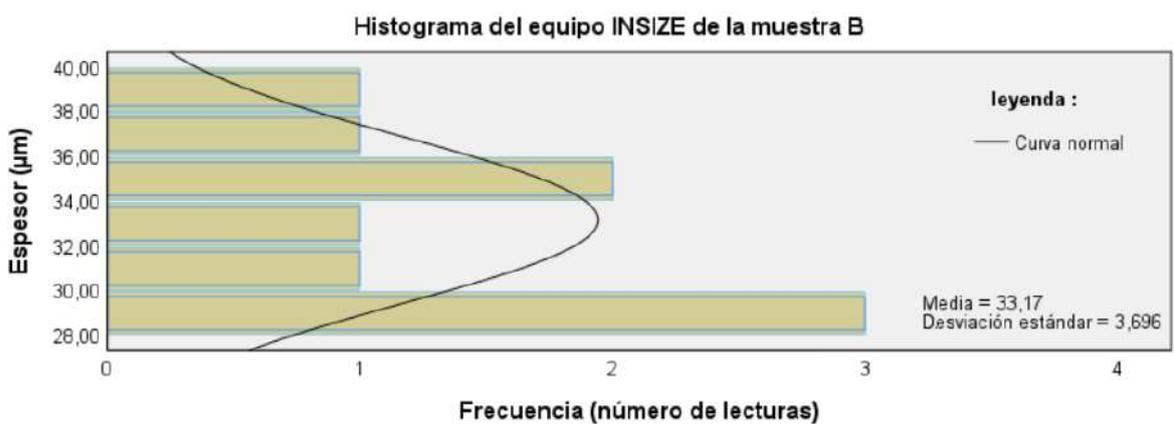


Figura 67. Gráfica de frecuencia de la muestra B en el equipo INSIZE [36]

Estadísticos descriptivos								
	N Estadístico	Rango Estadístico	Mínimo Estadístico	Máximo Estadístico	Media Estadístico	Media Error estándar	Desv. estándar Estadístico	Varianza Estadístico
Espesor con Calotest muestra A	9	10,23	34,06	44,29	38,7322	1,27142	3,81426	14,549
Espesor con calotets muestra B	9	10,08	31,24	41,32	35,5678	1,25707	3,77122	14,222
Espesor con ELCOMETER muestra A	12	10,30	39,30	49,60	45,3667	1,12616	3,90113	15,219
Espesor con ELCOMETER muestra B	12	11,20	38,30	49,50	43,5167	1,17046	4,05459	16,440
Espesor con INSIZE muestra A	9	16,50	26,00	42,50	32,2333	1,88422	5,65265	31,953
Espesor con INSIZE muestra B	9	10,10	28,70	38,80	33,1667	1,23209	3,69628	13,662
N válido (por lista)	9							

Figura 68. Medidas de tendencia central entre las muestras A y B con los distintos métodos de medición de espesores[36].

Calculando el error que existe entre las medias de cada muestra encontrada para cada equipo, se tiene los siguientes resultados.

Tabla 51. Error de la media de la muestra A comparada entre los equipos.

Error	CALOTEST	ELCOMETER	INSIZE
CALOTETS	0 %	17,12 %	16,78 %
ELCOMETER	17,12 %	0	28,9 %

Tabla 52. Error de la media de la muestra B comparada entre los equipos.

Error	CALOTEST	ELCOMETER	INSIZE
CALOTETS	0 %	22,36 %	6,75 %
ELCOMETER	22,36 %	0	23,8 %

La segunda funcionalidad del equipo para la caracterización de las superficies duras es lograr determinar el volumen y la tasa de desgaste que posee el recubrimiento y es por esta razón que se procede a calcular estos valores para las muestras ensayadas con el equipo, usando las ecuaciones Ecuación 8 y Ecuación 9.

Tabla 53. Datos para el cálculo

RPM [rad/s]	Φ eje [mm]	v_l [mm/s]	t (s)	d_s [mm]
314,16	20	3141,6	540	1696464

v_l = velocidad lineal; t = tiempo del ensayo; d_s = distancia de deslizamiento

El diámetro de los micro cráteres (d) se determina como la diferencia entre la distancia X y la distancia Y, ver la Figura 11, encontradas anteriormente.

Se elimina de las Tabla 48 y Tabla 49 aquellos valores de diámetros atípicos, a causa de que no se conoció el tiempo exacto en el que la esfera llegaba al material base.

Tabla 54. Volumen y tasa de desgaste de la muestra A

d [mm]	v_d [mm^3]	Q_d [$mm^2 * 10^{-5}$]
0,984	0,004602	2,71272
0,958	0,0041346	2,43718
0,993	0,0047727	2,81334
0,85	0,0025624	1,51043
0,907	0,003322	1,95819
media	0,003878	2,286

Tabla 55. Volumen y tasa de desgaste de la muestra B

d [mm]	v_d [mm^3]	Q_d [$mm^2 * 10^{-5}$]
0,854	0,002611	1,53906
0,887	0,0030385	1,7911
0,768	0,0017077	1,00663
0,828	0,0023072	1,36002
0,899	0,0032063	1,89001
media	0,002574	1,517

3.3. Análisis de resultados.

En la muestra A se tuvo que la media encontrada fue de 38,73 μm para el equipo Calotest, 45,36 μm para el medidor ELCOMETER y 32. 23 μm del medidor INSIZE, lo cual indica que el equipo Calotest presenta un error comparativo con los equipos ELCOMETER e INSIZE de 17,1 y 16,7% respectivamente.

Por otra parte, la muestra B se tuvo que la media encontrada fue de 35,56 μm para el equipo Calotest, 43.51 μm para el medidor ELCOMETER y 33. 16 μm del medidor INSIZE, lo cual indica que el equipo Calotest presenta un error comparativo con los equipos ELCOMETER e INSIZE de 22,36 y 6,7% frente a los medidores ELCOMETER e INSIZE.

Por estas razones, el prototipo Calotest consiguió medir los espesores de las muestras con error relativamente bajo, se debe tener en cuenta que el espesor de las muestras no se mantiene constante en toda la superficie, aun así, el equipo se mantuvo el rango de los

espesores calculados entre 30-40 μm , este rango es muy cercano al medido con los dos equipos.

Consecuentemente, el volumen de desgaste de las muestras A y B son de 0,003878 y 0,002574 mm^3 con una tasa de desgaste de 2,29 y 1,517 $mm^2 \times 10^{-5}$ respectivamente, esto es un claro resultado del recubrimiento de cromado duro, al presentar una elevada dureza que varía entre los 52,3 – 60 en la escala C de Rockwell [37] evitando gran separación del material de la superficie lo que es un indicativo de una elevada resistencia, tal como indica en el trabajo de grado “EFECTO DE LA CARGA NORMAL, LA VELOCIDAD Y LA DISTANCIA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y ABRASION DE UN RECUBRIMIENTO DE CROMO DURO” la tasa de desbaste tiene una relación directa con la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada[38] (peso de la esfera), si la carga aplicada no cambia el volumen de desgaste aumenta a medida que la esfera se mantenga desplazando sobre la muestra [29].

3.4. Conclusiones

En el presente trabajo se concibió y construyó con éxito el dispositivo Calotest. se llevó a cabo las operaciones de funcionalidad de este primer prototipo para cuantificar los espesores de los recubrimientos de superficies duras por medio de la micro abrasión y evaluar la resistencia al desgaste de manera indirecta analizando la tasa de volumen desbastado.

El equipo cuenta con una base de 350x300 mm y una altura máxima de 252 mm, con un peso de 7kg, todos sus componentes son desarmables y por ende se pueden remplazar en caso de que algunos de sus elementos se dañen, el material empleado para la sujeción de las muestras (Duralón), resulto ser de gran resistencia mecánica, un bajo costo. excelente para ser maquinado en la fresadora.

La mordaza se puede abrir hasta 73 mm, lo cual resulta conveniente, ya que usualmente, las muestras poseen un tamaño inferior a esta longitud. La sujeción es lo suficientemente firme para evitar el deslizamiento de las muestras durante el ensayo, se puede lograr inclinar la base de la mordaza desde los 0 a 90°, pero se obtiene mejores resultados si se trabaja las muestras a los 45°. El desplazamiento de la guía tipo T logra moverse transversalmente al eje una distancia de 50 mm, lo cual es una distancia prudente para acercar o alejar la muestra del eje, para este caso específico, la distancia de 11 mm fue la requerida para que la esfera se asiente de manera adecuada sobre la muestra.

El eje del motor puede ser desplazado horizontalmente 97 mm, lo cual permite el uso de los demás canales del eje para trabajar con las esferas de 25.4, 20, 15 y 10 mm, aunque durante toda la fase de ensayos se obtuvieron buenos resultados con la esfera de 25,4 mm. El equipo puede ser operado por un largo tiempo si problema a sobrecalentamiento del motor.

Este equipo presenta una limitación ya que solo podrá caracterizar el espesor de las superficies que se encuentre en un rango de 0,1 a 50 μm , en recubrimientos que superen las 50 μm es posible que la esfera no alcance a remover el volumen necesario para poder llegar al material base.

En conclusión, el equipo puede comenzar a operar en el laboratorio para realizar pruebas más exhaustivas, abriendo un paso a nuevas investigaciones en el área de materiales, las cuales tengan un enfoque al análisis de distintos tipos de recubrimientos.

3.5. Recomendaciones

- ❖ Se recomienda preparar las muestras pequeñas o que tengan una geometría irregular por medio del encapsulado usando la resina epoxy, para tener una mejor fijación en la mordaza.
- ❖ Se puede subir o bajar la mordaza 2 cm, lo cual se aconseja dejar centrada la mordaza para tener un juego de 1 cm hacia arriba y abajo, si se desea hacer ensayos en un solo eje.
- ❖ Si el ensayo va a durar más de 2 min, se recomienda realizar intervalos cada 100 s, ya que se consigue un mejor desbaste micro abrasivo en el lapsus que le toma el equipo en alcanzar la revolución ingresada.
- ❖ Se recomienda programar revoluciones en un rango de 600 a 4000 RPM.
- ❖ Las variables como el ángulo de inclinación, separación de la muestra al eje, tipo o concentración del líquido abrasivo, RPM y tiempo analizados en este proyecto no son estándares para los demás tipos de recubrimientos, por lo que se recomienda realizar ensayos de prueba.
- ❖ Una vez terminado cada ensayo se recomienda limpiar la esfera y el eje con un paño humedecido con alcohol, retirando el excedente del líquido abrasivo, ya que, de no hacerlo, causará que la esfera patine en la muestra sin causar el desgaste abrasivo o puede empezar a rebotar ligeramente causando un cráter irregular.
- ❖ Por otro lado, se recomienda limpiar el excedente del líquido abrasivo que se haya depositado en otras partes del soporte de las muestras o en su base deslizante, debido a que una vez se seque el líquido forma una fina capa pastosa que hace que se peguen las partes móviles.
- ❖ Se recomienda completar el equipo instalando un equipo que suministre de manera continua las gotas del líquido abrasivo.
- ❖ Se puede mejorar el sistema de sujeción de muestras cambiando el material de duralón por aluminio.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SCOPUS, “Analyze search results,” 2023. https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&src=s&sid=8c1dd4411be5de4d9dd691d5f99ffb1b&sot=a&sdt=a&sl=240&s=%28TITLE-ABS-KEY%28calotester*+OR+%22hard+coating%22%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28%22wear+thicknesses%22+OR+%22wear+testing%22+OR+%22wear+analysis%22%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28%22wear+resistance%22+OR+%22friction+wear%22%29+AND+TITLE-ABS-KEY%28%22Sliding+distances%22+OR+%22+Wear+of+materials%22%29%29&origin=resultlist&count=10&analyzeResults=Analyze+results (accessed Aug. 08, 2023).
- [2] N. J. van Eck, L. Waltman, and Centre for Science and Technology Studies, “VOSViewer.” Netherlands, p. 1, 2022. [Online]. Available: <https://www.vosviewer.com/>
- [3] E. Popova, V. L. Popov, and D. E. Kim, “60 years of Rabinowicz’ criterion for adhesive wear,” *Friction*, vol. 6, no. 3, 2018, doi: 10.1007/s40544-018-0240-8.
- [4] U. Search and R. Activities, “Standard Terminology Relating to Wear and Erosion,” *Current*, vol. 94, no. Reapproved, pp. 1–2, 1999.
- [5] L. Gustavo Hernandez Jimenez, *DETERMINACIÓN MEDIANTE MICROABRASIÓN DEL ESPESOR Y TASA DE DESGASTE DE RECUBRIMIENTOS DELGADOS DEPOSITADOS SOBRE MATERIALES METÁLICOS*, 1st ed. Editorial Área de Innovación y Desarrollo, S.L., 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2019.54>.
- [6] M. G. Gee *et al.*, “Ball Cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings,” United Kingdom, 2002. [Online]. Available: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2545/1/mgpg57.pdf>
- [7] J. Callister, D. William, and The University of Utah, *Ciencia e Ingenieria de Los Materiales*. 2020. [Online]. Available: www.FreeLibros.org
- [8] J. A. Galvan Martin, “El ensayo micro abrasivo por esfera rotativa libre en la caracterización de materiales de ingeniería y depósitos de recargue superficial,” Marta Abreu, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.uclv.edu.cu:8089/handle/123456789/10560>
- [9] J. L. MARULANDA A and Universidad Tecnológica de Pereira, “CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA PARA ENSAYO EN DESGASTE ABRASIVO; SEGUN NORMA TECNICA ASTM G-65.,” *Scientia et Technica*, vol. 41, no. 41, pp. 1–3, May 2009.
- [10] B. Narayanaswamy *et al.*, “Abrasive Wear Resistance of Ferrous Microstructures with Similar Bulk Hardness Levels Evaluated by a Scratch-Tester Method,” *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, vol. 50, no. 10, pp. 4839–4850, Oct. 2019, doi: 10.1007/s11661-019-05354-2.
- [11] T. Alloy, S. Plate, and S. Precision, “Standard Test Method for Pin Abrasion Testing 1,” *Current*, vol. i, no. Reapproved 2018, pp. 1–8, 2020.

- [12] ISO, "Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Determination of coating thickness by crater-grinding method," vol. 2009. pp. 1–8, 2003.
- [13] V. Rupetsov and R. Minchev, "Experimental Calo Tester for the Coating Thickness Measurement," *XV International Scientific Conference*, no. 11, pp. 188–192, 2016.
- [14] R. Bethke and N. Nöcker, "Schichtdicke und Verschleiß präzise bestimmen," *JOT, Journal fuer Oberflaechentechnik*, vol. 60. Springer Vieweg, pp. 36–41, Jul. 01, 2020. doi: 10.1007/s35144-020-0607-2.
- [15] R. C. Cozza, "Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests," *Tribol Int*, vol. 70, pp. 52–62, 2014, doi: 10.1016/j.triboint.2013.09.010.
- [16] F. Botko, M. Hatala, P. Beraxa, J. Duplak, and J. Zajac, "Determination of CVD coating thickness for shaped surface tool," *TEM Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 428–432, May 2018, doi: 10.18421/TEM72-26.
- [17] M. A. Quinones-Salinas and R. D. Mercado-Solis, "Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings," in *International Journal of Surface Science and Engineering*, Inderscience Publishers, 2015, pp. 493–509. doi: 10.1504/IJSURFSE.2015.072831.
- [18] R. L. Norton and Worcester Polytechnic Institute, *Diseño de Máquinas*, Cuarta. Worcester, Massachusetts, 2009.
- [19] Anton Paar, "Calotest series," *Networks*, 2022. <https://www.anton-paar.com/en/products/details/calotest/>
- [20] BAQ, "Medidor de espesor estacionario CaloTester kaloMAX NT II," *Networks*, 2022. <https://www.directindustry.com/prod/baq-gmbh/product-122821-1952327.html>
- [21] BAQ, "Stationary thickness gauge CaloTester kaloMAX II," *Networks*, 2022. <https://www.directindustry.com/prod/baq-gmbh/product-122821-1935460.html>
- [22] B. Dilts and K. Sun, "LucidChart." South Jordan, p. 1, 2022. [Online]. Available: <https://www.lucidchart.com/%0A>
- [23] C. Riba, "Herramientas para el diseño concurrente 3.1," *Ediciones UPC, España*, pp. 176–184, 2004.
- [24] C. Riba, "2 Estructuración del diseño 2.1," pp. 67–120, 2004.
- [25] C. Riba, "Diseño concurrente," 2002.
- [26] PROJECT HUB, "Diseño de caja fuerte con pantalla LCD, teclado, sonido y código," Jun. 05, 2019. <https://create.arduino.cc/projecthub/dpto-tecnolog-a-ies-rosario-acua/caja-fuerte-con-pantalla-lcd-teclado-sonido-y-codigo-d84335> (accessed Aug. 16, 2022).
- [27] Mootio components, "Catalogos de motores electricos," 2022. http://www.mootio-components.com/motor-corriente-dc-voltaje-1200v-rpm-3800rpm-con-encoder_ref_016707.html#.YwA1ynbMI2x (accessed Aug. 18, 2022).

- [28] RoboticsEC, "Motores RS775," 2022. <https://roboticsec.com/producto/motor-775-doble-eje-12v-3000rpm/> (accessed Aug. 18, 2022).
- [29] P. de Pesquisa and R. de Souza Suzuki, "Centro Universitário da FEI Projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre Relatório Final," Brasil, 2006. Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: <https://docplayer.com.br/73935378-Projeto-e-construcao-de-um-equipamento-de-ensaio-de-desgaste-micro-abrasivo-por-esfera-rotativa-livre.html>
- [30] RGPBALLS, "Precision Balls," Italy, May 2021. Accessed: Aug. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.rgpballs.com/srv/sheet-cat.ashx?cat=14&lng=es>
- [31] J. K. N. J. E. S. Richard G. Budynas, "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley," *McGrawhill*, vol. novena, 2008.
- [32] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, vol. cuarto. Pearson Educación, 2006.
- [33] REYES HERNÁNDEZ JUAN MANUEL, "INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL," 2019. Accessed: Aug. 28, 2022. [Online]. Available: <https://pdfslide.tips/documents/acero-aisi-sae-1018.html>
- [34] F. Beer, *Mechanics of materials*, vol. sexto. McGraw hill, 2012. [Online]. Available: www.elsolucionario.net
- [35] R. Alberto and S. Pazmiño, "Estudio de estrategias de mecanizado para fresado CNC de cavidades en Duralón," 2021.
- [36] IBM, "SPSS STATISTICS." 2023. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/products/spss-statistics>
- [37] HYDROMECHANICA, "Barras Cromadas Templadas para cilindros hidráulicos ," 2023. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.hydropneumatica.com/images/pdf/5.BARRAS-Y-TUBOS/BARRAS-CROMADAS-TEMPLADAS/BARRAS.pdf>
- [38] A. Bello González and W. Tuesta Sánchez, "EFECTO DE LA CARGA NORMAL, LA VELOCIDAD Y LA DISTANCIA SOBRE LA RESISTENCIA AL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y ABRASION DE UN RECUBRIMIENTO ELECTROLITICO DE CROMO DURO," Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2013. Accessed: Aug. 15, 2023. [Online]. Available: <http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/6654/1/TESIS%20BELLO%20TUESTA.pdf>
- [39] NBLEISON, "CATALOGO DE MOTORES SERIE 700," 2020. <https://5ororwxhiiqojj.leadongcdn.com/LS-RS-775-aidlmBqmKinSRqqnikrjji.pdf> (accessed Aug. 23, 2022).
- [40] SKF, "Rodamientos SKF," 2022. <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-607%2F8-2Z> (accessed Aug. 28, 2022).
- [41] INSIZE, "COATHING THICKNESS GAGE," 2023. <http://www.insize.com/Catalogue.html> (accessed Aug. 10, 2023).
- [42] ELCOMETER, "MEDIDOR DE ESPESORES DE REVESTIMIENTO," 2023. <https://www.elcometer.com/pub/media/contentmanager/content/456-es.pdf> (accessed Aug. 10, 2023).

