

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO
EXPERIMENTAL PARA LA MEDICION DE LA
DESVIACION RADIAL TOTAL COMPUESTA DE
ENGRANAJES RECTOS**

**JOSE FRANCO CORENA
DIEGO FERNANDO HERNANDEZ GUARIN**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO
EXPERIMENTAL PARA LA MEDICION DE LA
DESVIACION RADIAL TOTAL COMPUESTA DE
ENGRANAJES RECTOS**

**JOSE FRANCO CORENA
DIEGO FERNANDO HERNANDEZ GUARIN**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
RICARDO JAIMES ROLON
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2007

DEDICATORIA

A mis padres, a mi hermana y a mi novia. Fue duro, pero sin su apoyo la culminación de este proyecto no hubiera sido posible.

José.

DEDICATORIA

A mis padres, a los que les debo muchos de mis logros; no lo hubiera podido lograr sin su apoyo, paciencia y comprensión.

A mi novia, mis amigos y aquellas personas que siempre confiaron en mí y han estado a mi lado.

Diego Fernando

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial al Lic. Edgar Rodríguez, docente de la asignatura taller, ya que gracias a su asesoría y experticia fue que este proyecto pudo culminarse.

A nuestros papás por las “esquirlas” salvadoras.

A Yira, Ronal, Peto, Angie, Cele, Guerrero, Gilbert, Chucho y Celis, los cuales, hicieron sus aportes muy a su manera.

Al Ing. Ricardo Jaimes, por su asesoría como director de este proyecto.

Al Tecnólogo Ernesto Rincón, por su colaboración en la puesta a punto de la interfaz.

A nuestra querida Ana de Copi Quiz, por salvarnos la vida antes de entregar el presente documento.

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BANCO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICION DE LA DESVIACION RADIAL TOTAL COMPUESTA DE ENGRANAJES RECTOS *

AUTORES:

José Franco Corena.
Diego Fernando Hernández Guarín. **

PALABRAS CLAVES:

Diseño, Engranajes, Desviación.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es el de ofrecer a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, una herramienta pedagógica para el desarrollo integral de los estudiantes en el área de diseño, fomentando la investigación e innovación en nuevas tecnologías referentes a la evaluación de la calidad en la manufactura de los sistemas de engranajes.

La prueba consiste en la aplicación del método de inspección funcional para evaluar tres errores presentes en la manufactura de engranajes rectos, que son: desviación radial compuesta total, desviación compuesta diente a diente y descentramiento. La inspección funcional por rotación con un patrón implica a dos engranajes que endientan juntos, uno de los cuales es un engranaje patrón, preferiblemente de alta calidad, en donde son evaluados los parámetros de un engranaje durante la rotación. A su vez, esta prueba está fundamentada en la norma AGMA 915-2-A05.

El resultado es un estudio sobre un método que nos permite identificar de forma práctica una amplia variedad de problemas concernientes a la manufactura de engranajes rectos, permitiendo evaluar de forma clara y acertada si un engranaje es funcional o defectuoso y a la vez, permitiendo comparar la calidad de los diferentes métodos de fabricación de los mismos.

Estas características hacen de este banco experimental, una herramienta muy útil tanto para estudiantes y profesores como para la industria metalmecánica en general ya que evita los largos y tediosos procedimientos de evaluación metrológica tradicional y el desperdicio innecesario de fondos en aparatos muy sofisticados que salen del alcance de los pequeños empresarios del sector.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Ricardo Jaimes.

SUMMARY

TITLE:

DESING AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL BANK FOR THE MEASUREMENT OF THE TOTAL RADIAL COMPOSITE DEVIATION IN SPUR GEARS*

AUTHORS:

José Franco Corena.
Diego Fernando Hernández Guarín. **

KEY WORDS:

Design, Gears, Deviation

DESCRIPTION:

The object of this Project is to offer to the Escuela de Ingeniería Mecánica of Universidad Industrial de Santander, an educational tool for the integral development of the design area students, fomenting the research and innovation in new technologies referring to quality assessment in manufacturing of gear systems.

The test is an application of the functional inspection method, in order to evaluate three current deviations in the manufacture of spur gears: total radial composite deviation, tooth to tooth composite deviation and runout. Functional inspection with a master gear consists in a device which a pair of gears mesh together assembled with one gear acting as the master, preferably of high quality, where the parameters of the gear are evaluated during rotation. Besides, this test is based on AGMA 915-2-A05.

The result is a study of a procedure that allow us to identify in a practical way a wide variety of problems concerning to the spur gears manufacturing, allowing to verify in a clear and settled way if any gear is functional or dysfunctional and in the same time, allowing to compare the several manufacturing processes quality.

These characteristics make of this experimental tester, a very useful tool for students and professors and the metal mechanical industry as well, since it averts the long and tedious procedures of traditional metrology inspection and the unnecessary waste of funds in devices too sophisticated for the small companies of the sector.

* Project of grade

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Ricardo Jaimes.

CONTENIDO

	Pág.
NOMENCLATURA	16
GLOSARIO.....	17
INTRODUCCION	19
1. GENERALIDADES EN LA INSPECCION DE UN ENGRANAJE	22
1.1. HISTORIA DE LAS MAQUINAS DE INSPECCION DE ENGRANAJES	23
1.2. SISTEMAS DE INSPECCION DE ENGRANAJES	34
1.2.1. Sistema Analítico de Inspección.....	35
1.2.2. Sistema de Inspección Funcional	40
2. SISTEMA DE VERIFICACION DE ENGRANAJES RECTOS POR EL METODO DE RODADURA POR DOBLE FLANCO	45
2.1. PRINCIPIO DE LA PRUEBA.....	46
2.2. DESVIACIONES PRESENTES EN LA PRUEBA DOBLE FLANCO	47
2.2.1. Interpretación Gráfica de los Resultados Presentes en la Prueba	51
2.3. REQUISITOS DEL EQUIPO PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA PRUEBA.....	55
2.3.1. Descentramiento Mínimo o Cabeceo:.....	55
2.3.2. Paralelismo de ejes:	55
2.3.3. Montaje:	55
2.3.4. Cambios en la distancia entre centros:	56
2.3.5. Mantener un adecuado acoplamiento:.....	56
2.3.6. Otras Consideraciones:.....	57
2.4. ENGRANAJES PATRÓN	58
2.4.1. Designación del número de grado.....	59
2.5. CALIBRACIÓN	59
2.6. RELACIÓN ERROR-CALIDAD	62
3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO	64
3.1. SISTEMA DE GUÍA	66
3.1.1. Evaluación de Cargas	67
3.2. BASTIDOR	73
3.3. BOSIN DEL BASTIDOR.....	74
3.3.1. Selección de los rodamientos	74
3.4. MOTOR.....	76
3.5. ENGRANAJES	78
3.6. PORTACARÁTULA	81
4. DISEÑO DE EXPERIENCIAS Y ELABORACION DEL MANUAL	83

4.1. DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS.....	83
4.1.1. Contenido de las experiencias.....	84
4.1.2. Diseño del manual.....	86
5. PRUEBAS DINAMICAS Y DESCRIPCION DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS.....	88
5.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS...	88
5.2. PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO.....	89
5.2.1. Pruebas Dinámicas.....	89
CONCLUSIONES.....	96
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	100
ANEXOS.....	102

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los errores presentes en la manufactura de engranajes.....	22
Figura 2. Mecanismo Elevador de Agua por medio de Engranajes	23
Figura 3. Engranajes de madera para propósitos industriales básicos	24
Figura 4. Máquina de Vapor Accionada por Engranajes	25
Figura 5. Evolución Histórica en el Desarrollo de los Engranajes	25
Figura 6. Esquema de la Primera Patente de Medición del Flanco de Involuta por Generación	26
Figura 7. Mecanismo de Solución para la Inspección de Engranajes Helicoidales.....	27
Figura 8. Patrón Utilizado en los Mecanismos de Avance Senoidal	28
Figura 9. Esquema y Modelo de Verificador de Avance por Barra Senoidal..	28
Figura 10. Artefacto de Referencia de Involuta	29
Figura 11. Dispositivos Patrón para la Medición de Engranajes (A- Paso; B- Avance; C- Involuta).....	30
Figura 12. Máquina para Medición de Involuta, Avance, Paso y Descentramiento. (Höfler EFR S, 1976).	31
Figura 13. Máquina de medición de coordenadas (CMM).	32
Figura 14. Evolución Histórica de la Metrología en los Engranajes	33
Figura 15. Sistemas Manuales de Inspección Analítica	36
Figura 16. Clasificación de los Instrumentos de Medición Manual.....	38
Figura 17. Instrumentos de Medición Tradicional	38
Figura 18. Sistema de última generación para la medición de calidad e engranajes.....	39
Figura 19. Funcionamiento de los Equipos de Inspección Automáticos	40
Figura 20. Pruebas tipo mono flanco y doble flanco	41
Figura 21. Errores Presentes en la Prueba Monoflanco	42
Figura 22. Montaje Típico.....	43
Figura 23. Geometrías Involucradas en la Medición Tipo Doble Flanco	44
Figura 24. Acoplamiento de una prueba doble flanco.....	45
Figura 25. Esquema del Dispositivo de Verificación Radial Compuesta.....	46
Figura 26. Curva de la Desviación Compuesta Radial	48
Figura 27. Desviaciones de un Engranaje con Excentricidad	49
Figura 28. Perfil Funcional del Diente de un Engranaje Recto	50
Figura 29. Interpretación de las Desviaciones Compuestas Radiales.....	52
Figura 30. Interpretación Manual de la Prueba Compuesta.....	54

Figura 31. Error de Alineamiento en el eje de Rotación	60
Figura 32. Sistemas de calibración de la distancia entre centros.....	61
Figura 33. Calibración mediante engranajes patrones.....	61
Figura 34. Componentes Principales del Dispositivo	64
Figura 35. Parámetros principales (vista explosionada).....	65
Figura 36. Montaje del Sistema de Guía	66
Figura 37. DCL del Sistema de Guía.....	68
Figura 38. Diagrama de Cortante y Momento para el eje	70
Figura 39. Factor de Corrección de la Capacidad de la Carga Dinámica.....	71
Figura 40. Gráfico de Carga vs. Vida Requerida para los Rodamientos Lineales	72
Figura 41. Super Smart Ball Bushing Pillow Block (izquierda) y Soporte de los Ejes Guía (derecha)	73
Figura 42. Bastidor	73
Figura 43. Bosin de soporte al engranaje de prueba	74
Figura 44. Rodamientos de bolas (Ref. SKF 6202)	76
Figura 45. Representación ilustrativa del montaje para el cálculo inercial.....	77
Figura 46. Características de los dientes de los engranajes rectos	78
Figura 47. Engranajes de prueba: Baquelita (Izquierda), Prolón (Derecha)	79
Figura 48. Engranaje patrón.....	80
Figura 49. Propiedades de pares de engranajes (geometría de su acoplamiento)	81
Figura 50. Portacarátula	82
Figura 51. Experiencias realizadas en el banco.....	84
Figura 52. Fresado convencional versus fresado por generación.	85
Figura 53. Montaje de la Caja de Velocidades.	86
Figura 54. Descripción del Sistema de Adquisición de Datos	88
Figura 55. Resultados Fresado por Generación (Izq) Vs. Fresado Convencional (Der)	90
Figura 56. Curvas Representativas Para los Casos de Generacion (Arriba) y Convencional (Abajo)	91
Figura 57. Bakelita (Izq) Vs. Prolon (Der).....	92
Figura 58. Curva critica representativa Bakelita.....	93
Figura 59. Engranaje de caja de velocidades.....	94
Figura 60. Curva Representativas para Dos Velocidades de una Caja de Cambios (Arriba Velocidad 1, Abajo Velocidad 2)	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cargas recomendadas para engranajes metálicos	57
Tabla 2. Tolerancias para Engranajes Patrón (Modulo entre 0.2-2.5)	58
Tabla 3. Clasificación del Grado de Exactitud según el Error Permisible.....	63
Tabla 4. Resultados proceso de selección rodamiento de bolas	75
Tabla 5. Estructura de las experiencias del laboratorio	87
Tabla 6. Resultados Prueba Procesos Manufactura	91
Tabla 7. Resultados Bakelita Vs. Prolon.....	93
Tabla 8. Resultados Prueba en Sistema Mecánico Real	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Manual de prácticas	103
ANEXO B. Coeficiente So.....	120
ANEXO C. Planos.....	121

NOMENCLATURA

NOTACION	TERMINOS	UNIDADES
a	Distancia entre centros	mm
a_d	Distancia entre centros de prueba	mm
d	Diámetro de paso	mm
d_b	Diámetro de base	mm
F_{id}	Desviación radial compuesta total	μm
f_{id}	Desviación radial compuesta diente a diente	μm
F_r	Descentramiento	μm
f_e	Excentricidad	mm
L_g	Altura de apilado del bloque de galga	mm
m	Modulo	--
P_b	Paso	mm
R_r	Radio de Prueba	mm
s	Espesor del diente	mm
z	Número de dientes	--
α	Angulo de presión	grados
β	Angulo de hélice	grados
δ	Angulo medio	grados
ι	Angulo medio del espesor del diente	grados
ε_β	Relación helicoidal de traslapo	--
A	Addendum (Altura de cabeza)	mm
b	Deddendum (Altuar del pie)	mm
c	Holgura	--
d_o	Diámetro Exterior	mm
d_R	Diámetro de Raíz	mm
h_T	Altura Total	Mm
F_R	Carga Radial Sobre Rodamiento de Bolas	N

GLOSARIO

ENGRANAJE PATRÓN: Es un engranaje de exactitud conocida, diseñado para ser acoplado al engranaje a ser inspeccionado para desviación total radial compuesta.

ENGRANAJE DE PRUEBA: Es el engranaje el cual será sometido a evaluación.

DESVIACION RADIAL COMPUESTA DIENTE A DIENTE (fid): La desviación radial compuesta diente a diente es el valor de la mayor desviación radial compuesta dentro de cualquier paso, cuando el engranaje de prueba es girado una revolución completa con su flanco derecho e izquierdo simultáneamente en contacto con aquellos del engranaje patrón.

DESVIACIÓN TOTAL RADIAL COMPUESTA, (Fid): La desviación total radial compuesta es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de distancia entre centros que ocurren durante la prueba.

BACKLASH (HUELGO): La diferencia entre el espacio entre dientes y el ancho del diente se conoce como huelgo. El espacio entre dientes debe ser mayor que el ancho del diente medido sobre el círculo de paso. De no ser así, los engranes trabajarían con los dientes muy apretados.

MENSURANDO: Magnitud medida por un instrumento.

MÉTODOS DE MEDICION COMPUESTOS: Miden el efecto acumulativo de errores individuales.

MÉTODOS DE MEDICIÓN INDIVIDUALES: Miden los errores (avance, perfil, paso y espesor del diente) en forma individual.

INTRODUCCION

Entre los mecanismos de transmisión de movimiento, uno de los más exitosos es el basado en engranes, ya que se consiguen movimientos de manera continua, semicontinua o alternada y provee una amplia gama de posibilidades de transmisión gracias a los diferentes tipos de diseños posibles. Por lo tanto, deben ser muy precisos si su capacidad de carga y los niveles de ruido deben ser aceptables en servicio.

Los perfeccionamientos conseguidos en la fabricación de los engranajes, la investigación científica y los métodos de trabajo han conducido al estudio de instrumentos de medida de precisión que permitan la verificación y el control de un determinado engranaje en sus características, ya sea del dentado como de sus otros parámetros: distancia entre centros, agujero, centrado, etc.

El desafío para mantener una calidad constante requiere de una apreciación precisa del comportamiento operacional de los engranajes, a través de un método que busque encontrar el efecto total de errores presentes en los mismos; dicho método de prueba debe simular las condiciones bajo las cuales es probable que un juego de engranajes opere como resultado de su acoplamiento. El método que se ajusta a esta necesidad, es el conocido como *desviación radial total compuesta*, en el cual prepondera el análisis del desplazamiento radial, que permite evaluar de forma segura y rápida el grado de error de los dientes.

El presente trabajo de grado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA DESVIACIÓN RADIAL COMPUESTA TOTAL DE ENGRANAJES RECTOS”** hace parte de un proceso de actualización de laboratorios emprendido por la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, que busca conseguir una herramienta para el estudio de la desviación radial total compuesta de un engranaje, la cual servirá de apoyo complementario al estudiante del área de diseño y que además ofrece ventajas respecto a los medios convencionales de control de calidad que carecen de un desempeño rápido y eficiente; permitiendo también, la observación del comportamiento de un sistema dinámico real en un ciclo de trabajo.

El capítulo 1 tiene como fin presentar los conceptos fundamentales de la teoría de los diferentes sistemas de inspección existentes para las diferentes clases de engranajes, mostrando tanto la forma convencional, como los sistemas de inspección analíticos; además, se hará una breve descripción de los sistemas de inspección monoflanco y doble flanco, los cuales constituyen la estructura básica de los procedimientos, análisis y cálculos que se realizarán posteriormente.

En el capítulo 2, se presenta el sistema de verificación de engranajes rectos por el método de rodadura por doble flanco, se describe además, el equipo a utilizar (mostrando sus aplicaciones y limitaciones) y se definen los diferentes tipos de errores que se presentarán durante el análisis de la prueba.

El capítulo 3 muestra la descripción referente al diseño y construcción, presentando además el modelamiento en CAD del dispositivo.

El capítulo 4 contiene la descripción de las Prácticas para el laboratorio de diseño.

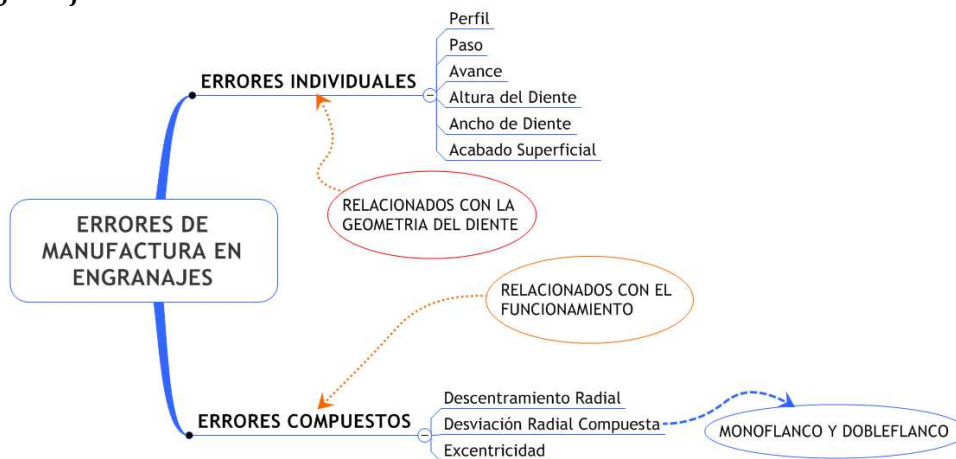
Finalmente, en el capítulo 5 se muestran los resultados de las pruebas dinámicas en el dispositivo en conjunto con la descripción del sistema de adquisición de datos.

1. GENERALIDADES EN LA INSPECCION DE UN ENGRANAJE

Desde el instante en que aparecieron los primeros engranajes, se vio la necesidad de inspeccionarlos para poder incrementar la carga a transmitir, mejorar su eficiencia y obtener gran exactitud con la cual deberían permanecer durante todo su periodo de trabajo.

La manufactura de un engranaje, es un proceso de precisión, por lo cual, está sujeto a todas las imprecisiones o errores que puedan presentarse durante el mismo, tales errores se dividen en dos grandes categorías: los errores individuales y los errores compuestos, los cuales, están inmersos en los sistemas de inspección analítico y funcional, respectivamente (Figura 1).

Figura 1. Clasificación de los errores presentes en la manufactura de engranajes



Fuente: Propia

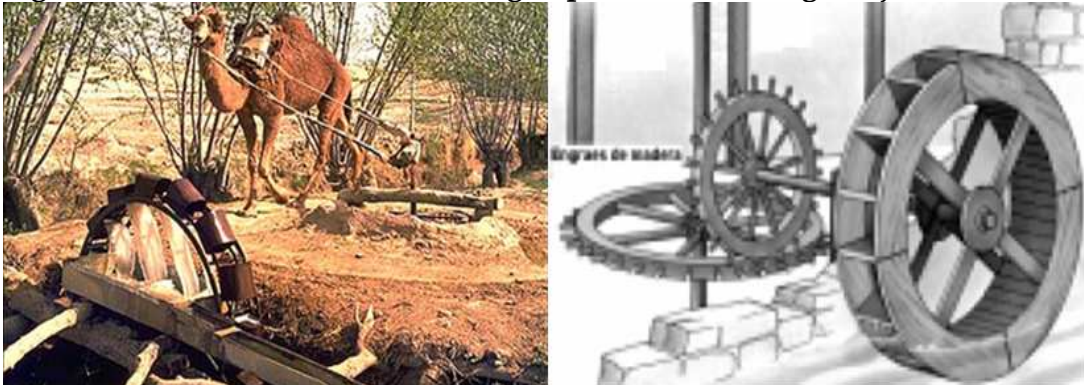
Lo anterior, sugiere que los errores presentes en estos elementos mecánicos pueden ser determinados mediante la medición directa de dichos parámetros y la confrontación de estas medidas con las relaciones teóricas (en el caso de

los sistemas de analíticos) o mediante la medición de los mismos durante su funcionamiento (sistemas funcionales), lo cual será tratado de una forma más detallada en la sección 1.2.

1.1. HISTORIA DE LAS MAQUINAS DE INSPECCION DE ENGRANAJES [1]

Nadie está completamente seguro de cuando los engranajes fueron inventados. Los arqueólogos creen que la rueda fue inventada alrededor de 5.000 A.C., sin embargo, los engranajes vinieron cierto tiempo después. Se cree que todo comenzó cuando en la antigüedad, el ser humano tuvo la idea de sustituir el acarreo manual de agua, por el animal, mediante la utilización de una rueda dentada horizontal conectada con una rueda vertical dentada: los cubos levantarán el agua por un mecanismo engranado de tracción animal (Figura 2).

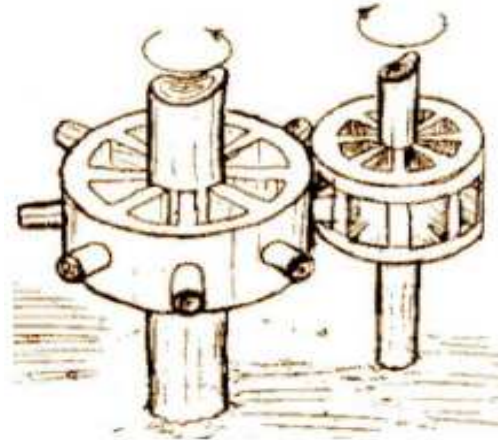
Figura 2. Mecanismo Elevador de Agua por medio de Engranajes



Adaptada de: Connections

Las primeras descripciones de engranajes fueron encontradas alrededor del año 300 A.C. En el principio, los engranajes para propósitos industriales básicos fueron hechos de madera (Figura 3).

Figura 3. Engranajes de madera para propósitos industriales básicos



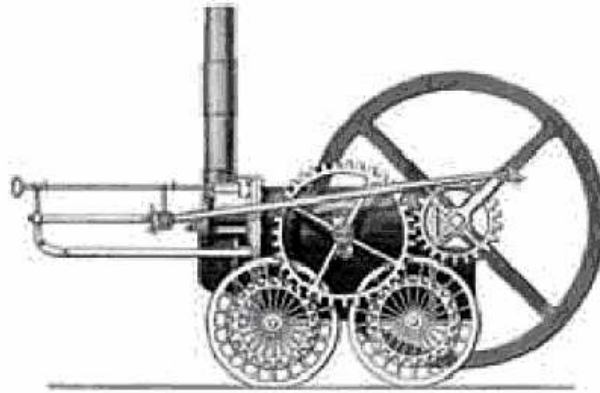
Fuente: Direct Gear Design for Automotive Applications, SAE 2005.

Alrededor del año 100 A.C., engranajes hechos de metales suaves tales como bronce fueron desarrollados, según lo evidenciado por el dispositivo de Antikythera, cuya construcción se realizó alrededor del año 80 A.C., diversas aplicaciones para los engranajes habían sido desarrolladas en épocas antiguas.

Aunque el hierro había sido utilizado para las armas y herramientas durante mucho tiempo, no fue hasta la revolución industrial que los métodos para formar o cortar los dientes del engranaje llegaron a ser de uso frecuente. Los engranajes de hierro fundido proporcionaron una mejora enorme sobre los engranajes de madera, pero estos engranajes primitivos, eran de exactitud baja y por lo tanto, no valía la pena realizar una medición.

Al comienzo del siglo XIX, las máquinas de vapor se volvieron prácticas a nivel industrial y como consecuencia, surgió un tremendo desarrollo en la industria metalmeccánica (Figura 4).

Figura 4. Máquina de Vapor Accionada por Engranajes



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

No fue sino hasta este momento cuando las maquinas se hicieron populares en las aplicaciones más comunes: bombas, vehículos, barcos y trenes. Para esta misma época la electricidad se convirtió en un aspecto importante en la industria, con el único inconveniente de ser rentable económicamente a altas velocidades de rotación. El gran problema radicaba en que los engranajes realizados en la época eran de muy baja calidad y por lo tanto ineficientes a altas velocidades de trabajo. Afortunadamente, con el advenimiento de las maquinas herramienta, se pudo controlar dicho problema, permitiendo el crecimiento de esta tecnología. La maquina para tallar engranajes fue desarrollada alrededor de 1900 e hizo posible un mejor corte en los flancos de los engranajes, mejorando así su calidad. La Figura 5 muestra la evolución en el desarrollo de los engranajes hasta comienzos del siglo XX.

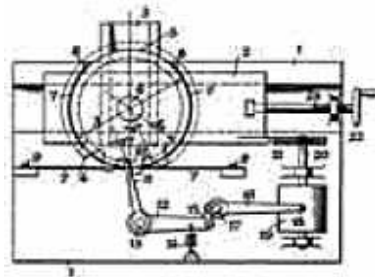
Figura 5. Evolución Histórica en el Desarrollo de los Engranajes

Engranajes de Madera	Engranajes de Hierro		Engranajes de Bronce	Engranajes de Involuta	Velocidad de Rotación Mayor	Revolución Industrial			
0	1450			1800	1900				
Elevación de Agua	Molinos de Agua	Relojes	Molinos	Cajas de Velocidades	Cabrestante	Motor a Vapor	Conformado de Metales	Rodamientos de Bolas	Fresado por Generación

Adaptada de: Gear Products Magazine. Octubre 2006

A principios del siglo XX, fueron fundadas compañías especiales para la producción de engranajes, presentando el inconveniente de la carencia de equipos que maquinaran e inspeccionaran de forma satisfactoria. Fue hasta en 1922, cuando en Suiza se inventó el difícil método de medir el flanco de involuta por generación desde el círculo base (Figura 6).

Figura 6. Esquema de la Primera Patente de Medición del Flanco de Involuta por Generación



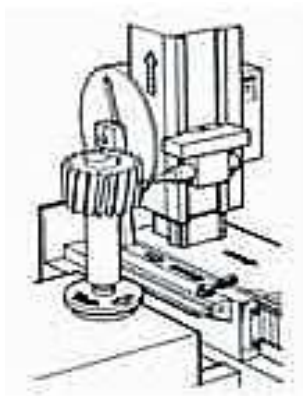
Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

En 1923, el instrumento para la medición de la involuta se introdujo a la industria con gran éxito, lo que trajo consigo la inclusión de muchas compañías en este negocio, conllevando al desarrollo de nuevas ideas y diseños, haciéndolos cada vez más simples y confiables. Algunas características de este tipo de mecanismos tuvieron que ser realizadas de forma muy exacta: el diámetro del disco base, la deformación de la regla, la posición de la punta de la probeta sobre la regla y el escalamiento del gráfico. El hecho de tener la capacidad de examinar los engranajes, cuestionó la forma de encontrar los errores presentes en los mismos, lo que condujo a mejorar las capacidades de fabricación.

Alrededor de 1930, los engranajes helicoidales pudieron ser fabricados eficientemente, encontrando su uso en la industria automotriz; debido a la

forma de sus dientes, éstos son mucho más complicados que los rectos, trayendo nuevos problemas en exactitud y en la medición. Una solución para medir el paso en los engranajes helicoidales fue inventada alrededor de 1945 y consistía en un mecanismo senoidal incluido en el disco base de los verificadores de involuta, que hizo posible la inspección del paso de los flancos como se ilustra en la Figura 7. Una regleta se mueve por este mecanismo mientras que la probeta es conducida hacia arriba y hacia abajo a lo largo del flanco del diente. Un flanco completo correcto producía una línea recta.

Figura 7. Mecanismo de Solución para la Inspección de Engranajes Helicoidales



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

Sin embargo, el mecanismo de disco senoidal era difícil de fijar con precisión. El ajuste fue posible solamente mediante el uso de un patrón de avance con un ángulo de hélice conocido. Éste fue el nacimiento de los artefactos de avance. Estas máquinas fueron ajustadas mecánicamente para mostrar el resultado del ángulo de hélice del artefacto de avance (Figura 8).

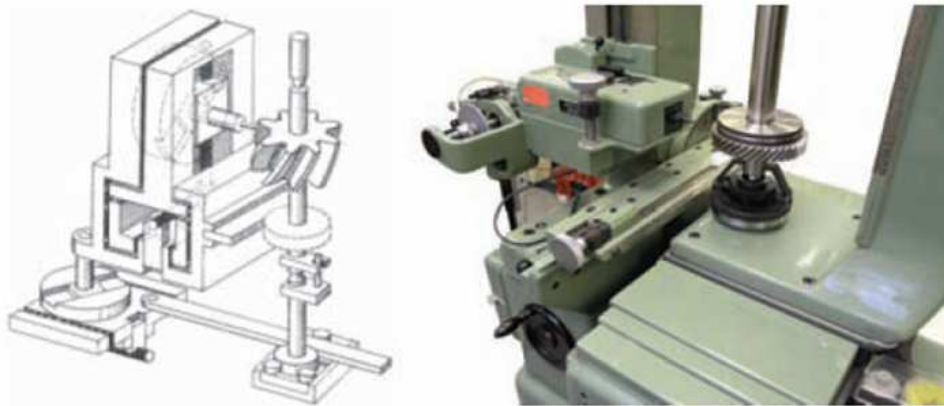
Figura 8. Patrón Utilizado en los Mecanismos de Avance Senoidal



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

Para una adecuada comprobación del perfil de involuta, son necesarios discos de círculo base de gran exactitud, para cada diámetro del engranaje a verificar. Un segundo sistema de disco senoidal y palanca, tomaba la diferencia de tamaños del círculo base de trabajo y lo comparaba con el tamaño correcto. En la industria, las máquinas de medición que realizaban mediciones de círculos base y avance helicoidal variables fueron comúnmente utilizadas después de 1960 (Figura 9).

Figura 9. Esquema y Modelo de Verificador de Avance por Barra Senoidal



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

Así como existían problemas para el ajuste del mecanismo para la medición del avance helicoidal, lo mismo ocurrió para los mecanismos de círculo base variable, era entonces necesario un artefacto de involuta verdadero con contorno definido (Figura 10). Estos artefactos en espiral tenían un módulo grande para permitir un ajuste exacto del mecanismo sobre el recorrido total de la variación. Junto con el artefacto de avance, estos artefactos se convirtieron en la base para la exactitud de engranajes. A partir de esa época, una cantidad de diversos diseños para los artefactos fueron creados y utilizados para la calibración, cuyos diseños se utilizan incluso hasta hoy.

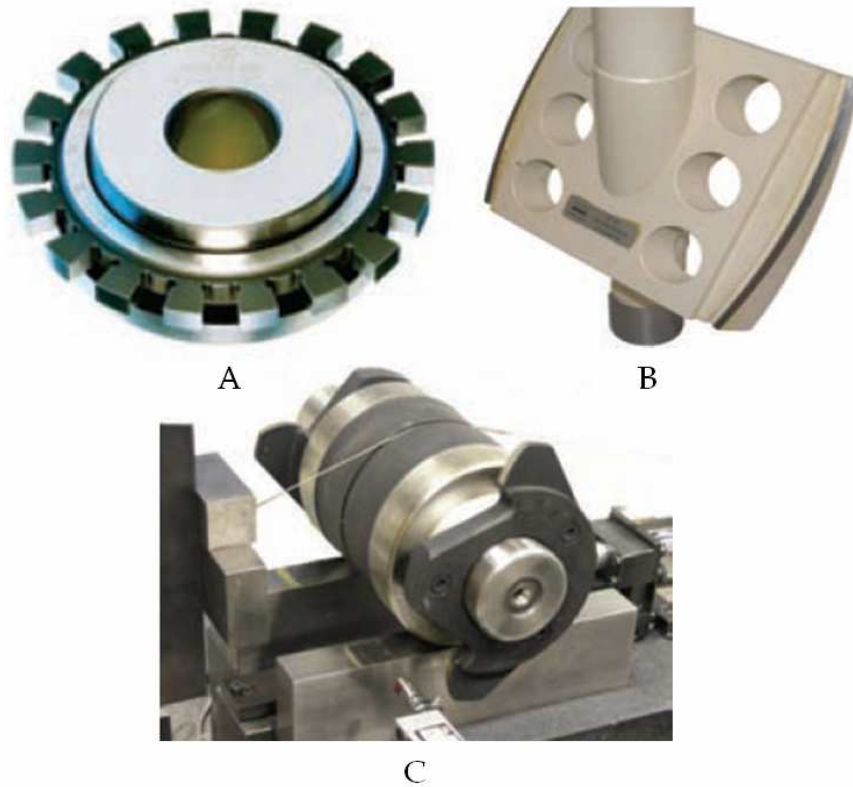
Figura 10. Artefacto de Referencia de Involuta



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

Las diferentes naciones y sus respectivos institutos de metrología comenzaron a interesarse en los dispositivos de engranajes a partir de 1920-1930. La importancia de estos dispositivos se incrementó radicalmente cuando la calibración de las máquinas que medían engranajes recayó sobre ellos poco después de 1960. A partir de entonces, fueron desarrollados artefactos para cada nación, permitiendo la medición y la comparación más exacta entre los diversos institutos de diferentes países (Figura 11).

Figura 11. Dispositivos Patrón para la Medición de Engranajes (A- Paso; B- Avance; C- Involuta)



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

La inspección de paso y descentramiento empezaron a verse en máquinas especiales alrededor de 1935 y la construcción para este tipo de características se ha realizado desde entonces. Además, se desarrollaron dispositivos de medición de paso que son útiles para mediciones de comparación directa y para la calibración de máquinas de medición.

Gracias a la rápida evolución de la electrónica, los desarrollos en la clasificación de la medición y en la variación del descentramiento fueron integrados en las máquinas de medición de involuta y de avance; este tipo de

máquinas comenzaron a conquistar el mercado en 1975 (Figura 12). Los métodos de representación gráfica directos fueron cambiados a métodos impresos utilizando conexión electrónica desde la aguja de medición hacia los instrumentos de representación gráfica. Estas máquinas eran difíciles de operar y representaron el último paso de desarrollo antes que las máquinas de prueba de engranajes de control numérico se incorporaran en el medio, para su uso general.

Figura 12. Máquina para Medición de Involuta, Avance, Paso y Descentramiento. (Höfler EFR S, 1976).



Fuente: Gear Products Magazine. Octubre 2006

En la industria, el uso normal de las máquinas-herramienta de control numérico (NC) comenzó alrededor de 1975. En 1980, el CNC fue integrado en las máquinas para medición de engranajes; los dispositivos convencionales para medir el perfil y el avance fueron utilizados para comprobar la exactitud del mecanismo de la máquina de inspección, su electrónica y el software de evaluación. A partir de ese año, las máquinas de medición CNC para engranajes y las máquinas de medición de coordenadas en 3-D (CMM -

Coordinate Measuring Machines) reemplazaron todas las máquinas mecánicas antiguas, cabe añadir que las máquinas tipo CMM con mesones rotatorios trabajaron como máquinas de medición de engranajes como la ilustrada en la Figura 13.

Figura 13. Máquina de medición de coordenadas (CMM).



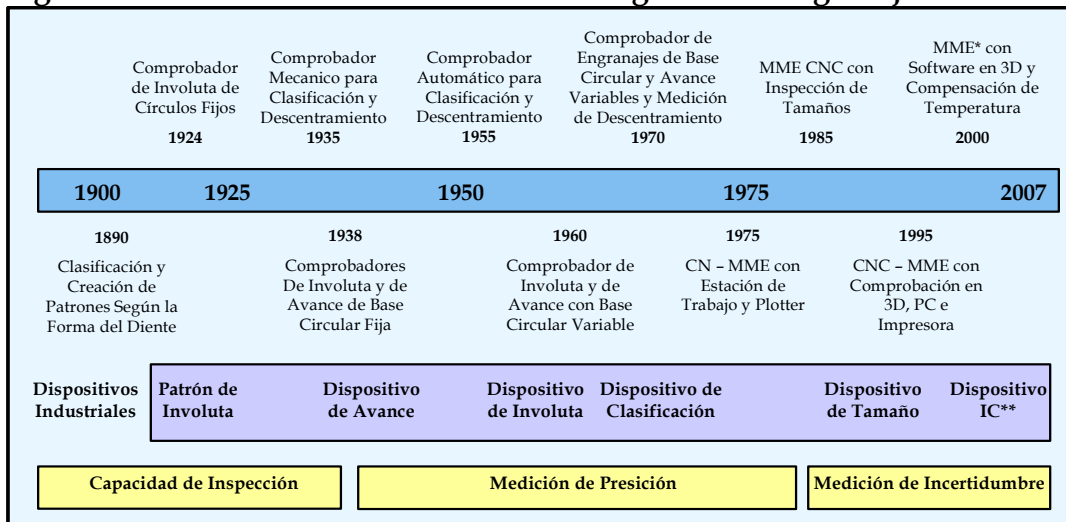
Fuente: Process Equipment Company.

Con el advenimiento de estos nuevos equipos, el antiguo formato para las medidas de exactitud (tipo "alto" o "bajo") se tornó obsoleto debido a que los resultados de las mediciones tienen que mostrar la incertidumbre real de la medida, no la relativa. Pero, ¿cómo cuantificamos las incertidumbres de la medida? Varios métodos fueron creados y encontraron su forma en los estándares (ISO, VDI, VDA). Véase la Figura 14 para conocer la evolución en el desarrollo de las capacidades en la metrología de engranajes.

El método que mejor simplifica la evaluación de la incertidumbre es la técnica experimental que utiliza la comparación de medida con patrones calibrados;

este método puede ser aplicado para mediciones en engranajes, si existen los artefactos similares a los objetos, para realizar dicha prueba.

Figura 14. Evolución Histórica de la Metrología en los Engranajes



* MME: Máquinas de Medición de Engranajes

** IC: Identity Condition

La medida en la incertidumbre encontrada por comparación con un patrón está basada en cuatro condiciones fundamentales:

- A. La variación y la medida de la incertidumbre del artefacto en sí tienen que ser conocidas de antemano.
- B. El tamaño y la geometría del espécimen y del accesorio tienen que ser similares.
- C. La comparación de los resultados se debe realizar bajo condiciones ambientales controladas.
- D. Todas las clases de características medidas tienen que existir en el artefacto.

El equipamiento de las máquinas de medición de engranajes ha cambiado gradualmente durante los últimos ochenta años, ahora, ha llegado la hora de adaptar los dispositivos de medición a las demandas modernas. En la búsqueda de tal propósito, se ha creado un nuevo concepto que consiste en utilizar accesorios para engranajes que contienen todas las características principales de los engranajes patrones normalizados y que además posean un perfil similar a las piezas de trabajo a ser revisadas.

Con estos accesorios es posible, por primera vez en años, determinar la incertidumbre en mediciones realizadas a engranajes de una manera fácil y rápida, además, es posible fabricarlos en cualquier diseño imaginable, pueden ser manufacturados para engranajes, de dientes internos y externos, de diversos módulos y variados diámetros primitivos. El tamaño geométrico se puede adaptar a los engranajes plásticos pequeños o incluso a las cajas de engranajes industriales grandes.

1.2. SISTEMAS DE INSPECCION DE ENGRANAJES

Las transmisiones defectuosas son producidas en gran parte por los errores presentes durante la construcción de los engranajes, generando ruido y desgaste prematuro de todo el sistema de transmisión, lo cual, puede llegar a ser muy grave en un sistema mecánico. Es necesario considerar también los materiales que, aun admitiendo que correspondan a la carga de trabajo a la que está sometido el engranaje, deben estar exentos de defectos físicos como, por ejemplo, estructura gruesa, sopladuras, costras, dureza deficiente debido a un tratamiento defectuoso, etc.

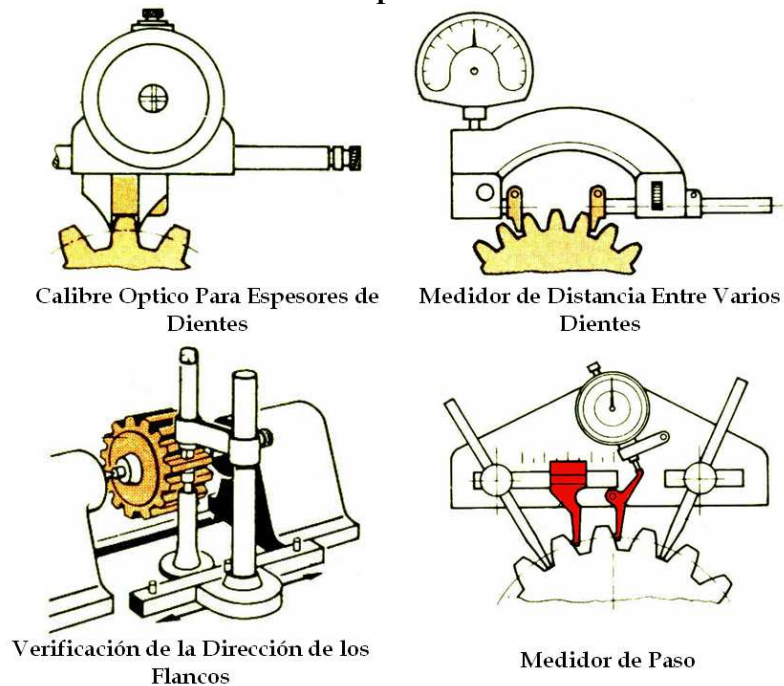
Un sistema de inspección puede definirse como el conjunto de instrumentos, patrones de calibración, conceptos y leyes físicas, procedimientos, valores de propiedades y constantes, etc., que tienen por objeto determinar el valor de una magnitud particular denominada *mensurando*, con el fin de comprobar si dicho valor está acorde a las necesidades o solicitudes de un requerimiento técnico dado por una norma o estándar.

El campo de inspección de engranaje puede ser dividido en dos amplias categorías: *la inspección analítica de elementos dimensionales* en donde se evalúan parámetros geométricos como: el perfil, el espaciado, avance, el espesor de diente y *la inspección funcional por rotación*, la cual, implica el acoplamiento de dos engranajes, uno de los cuales debe ser un patrón, para determinar los errores presentes en su funcionamiento.

1.2.1. Sistema Analítico de Inspección

Los sistemas analíticos de inspección, son aquellos utilizados para la realización de mediciones metrológicas de forma directa sobre la pieza de trabajo, en nuestro caso, sobre los dientes de los engranajes, con el objetivo de determinar los errores en los siguientes parámetros (Figura 15): paso, avance, involuta (perfil), espesor del diente, distancia entre dientes, etc., es decir, es el sistema que contempla la medición de los errores individuales de los engranajes.

Figura 15. Sistemas Manuales de Inspección Analítica



Adaptada de: Alrededor de las Máquinas Herramienta. Página 262

Además de la comprobación de los dientes, el engranaje debe ser inspeccionado para la anchura de la cara, diámetro externo, tamaño del agujero, etc. En engranajes muy críticos, muchos otros detalles como el radio de punta, la forma de filete de raíz y el acabado superficial son sujetos a controles estrictos y mediciones directas.

1.2.1.1. Equipos De Inspección

Dentro del sistema analítico de inspección, encontramos dos clases de equipos para la evaluación metrológica para realizar esta tarea, en los primeros la medición es realizada por un operario con un equipo calibrado (medición manual) y los segundos, realizan las mediciones de forma

completamente automática y en la mayoría de los casos, en los tres ejes de movimiento en forma simultánea (medición automática).

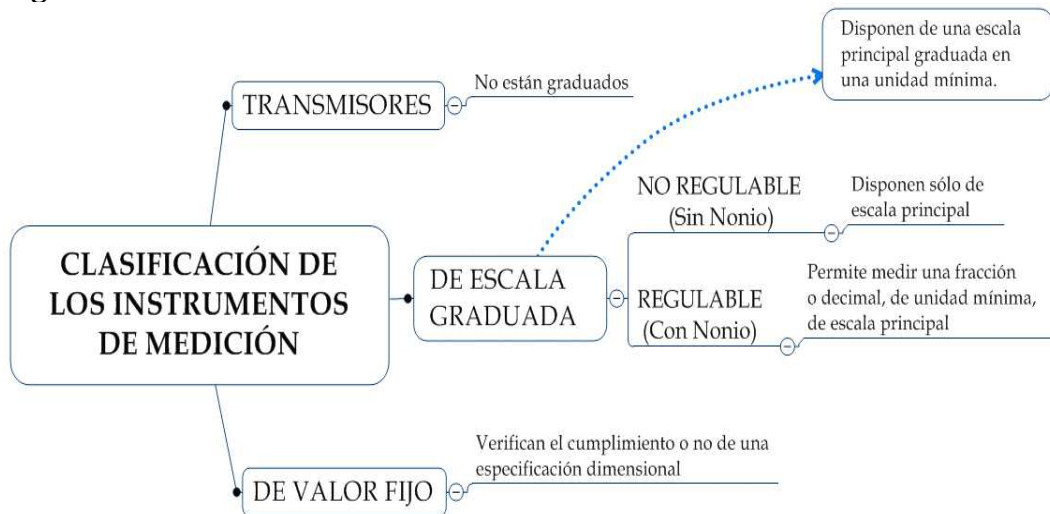
1.2.1.1.1. Equipos De Inspección Manual

Los dispositivos para la evaluación metrológica de forma manual (tradicional), tienen el inconveniente que el criterio del operario es el único respaldo para garantizar una correcta medición, sin embargo, en algunas ocasiones es la salida más rápida para la realización de la medición debido a su buena precisión, amplio rango de tolerancias y principalmente, facilidad de manejo.

Los equipos en esta categoría pueden ser clasificados en diferentes categorías (Figura 16), lo que les brinda una amplia variedad de formas y presentaciones (analógicos y digitales), convirtiéndose en instrumentos versátiles y muy prácticos para su uso en la industria.

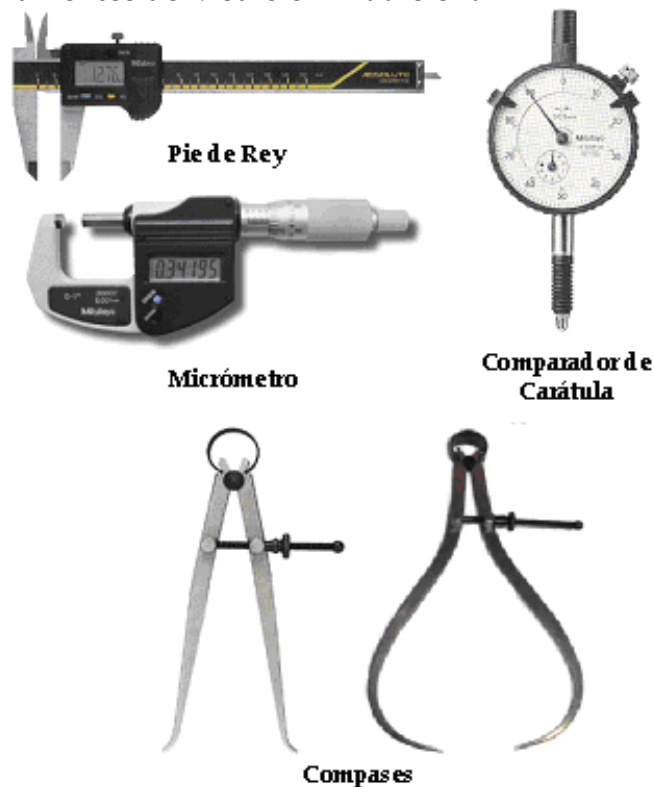
Los instrumentos tradicionales (o estándar) para la medición de errores individuales han sido extensamente utilizados y son adecuados para definir la calidad del engranaje (Figura 17), sin embargo, para engranajes de alta eficiencia, es recomendable el uso de sistemas de inspección automática gracias a su altísima exactitud en la medición.

Figura 16. Clasificación de los Instrumentos de Medición Manual



Fuente: Propia

Figura 17. Instrumentos de Medición Tradicional



Fuente: Mitutoyo

1.2.1.1.2. Equipos De Inspección Automática

Los más recientes sistemas de inspección de engranajes ofrecen pruebas automatizadas y análisis por computador en línea para salida gráfica con resoluciones menores a 1 micrómetro (Figura 18).

Figura 18. Sistema de última generación para la medición de calidad e engranajes.



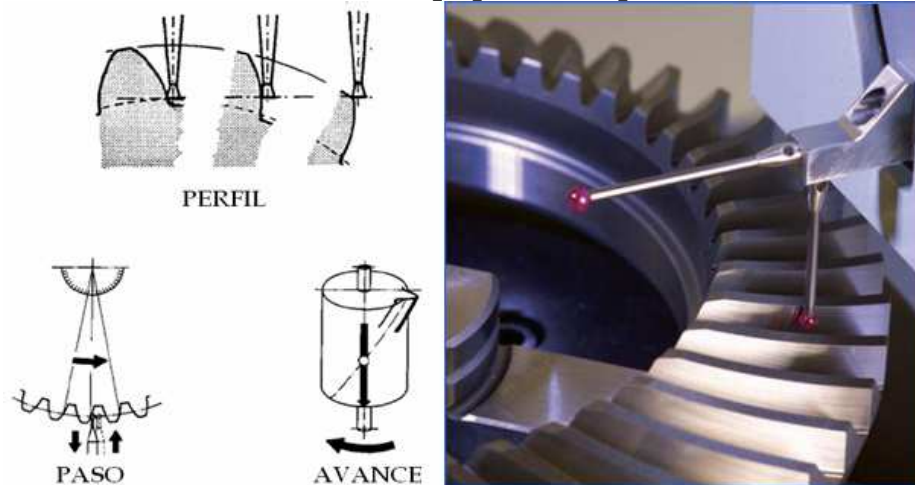
Fuente: Mitutoyo

Este tipo de equipos presenta dentro de sus ventajas, la posibilidad de análisis en los planos XY , YZ y XZ de forma simultánea, además, cuentan con dispositivos que garantizan un control óptimo del movimiento como son: escalas graduadas, servomotores, resistencia a vibraciones externas, compensación térmica, entre otros.

Este tipo de inspección es realizada con la ayuda de sensores que evalúan los diferentes parámetros de los engranajes para determinar si estos se encuentran dentro del rango requerido, evaluando diente por diente todo el

engranaje, lo que permite una evaluación completa y absoluta de los mismos; en la Figura 19 se puede apreciar como es realizada la medición para el perfil, el paso y el avance de un engranaje y como se compara con un equipo de inspección real.

Figura 19. Funcionamiento de los Equipos de Inspección Automáticos



Adaptada de: Gear Products Magazine. Octubre 2006

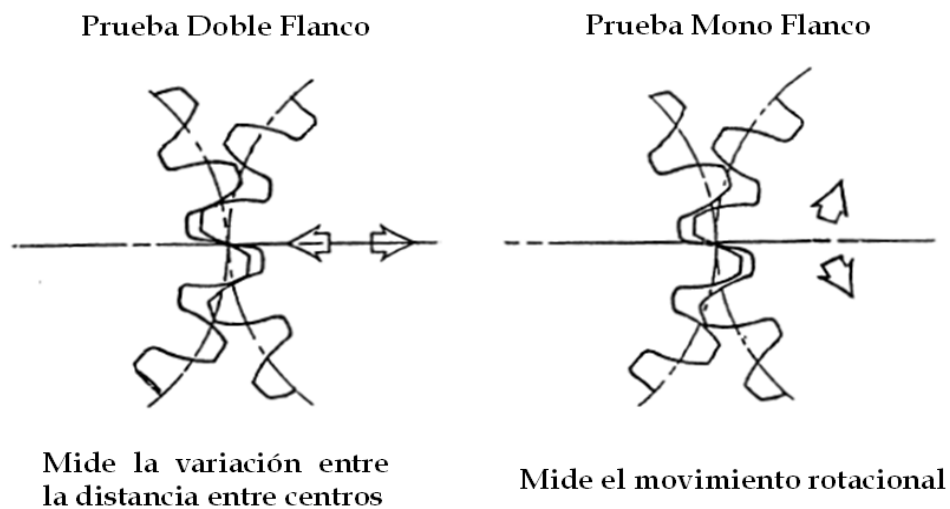
Existen también conjuntos para prueba de engranajes que realizan el último control del funcionamiento racional de un sistema y son auténticas y propias máquinas que simulan su funcionamiento práctico en el sitio de trabajo; a este tipo de dispositivos se les conoce como sistemas de medición funcional.

1.2.2. Sistema de Inspección Funcional

La inspección funcional por rotación con un patrón implica a dos engranajes que endientan juntos, uno de los cuales es un engranaje patrón, preferiblemente de alta calidad, en donde son evaluados los parámetros de un engranaje durante la rotación. Este tipo de pruebas son atractivas para la

inspección porque son rápidas y fáciles de comprender en comparación con los métodos convencionales. Hay dos tipos de pruebas por rotación con un patrón: doble flanco y mono flanco como se ilustra en la Figura 20.

Figura 20. Pruebas tipo mono flanco y doble flanco



Fuente: The Design and Analysis of Single Flank Transmission Error Tester for Load Gears

La prueba por rotación con un patrón más común es la de doble flanco, en la que dos engranajes son endentados en ambos flancos de modo que no haya ningún espaciamiento. La variación en la distancia de centro es medida cuando los engranajes se hacen girar. Esta es una prueba simple, y por esta razón, es atractiva, pero tiene la dificultad que es por lo general imposible interpretar el modelo de diente-a-diente de la curva de variación de distancia entre centros en términos de errores elementales.

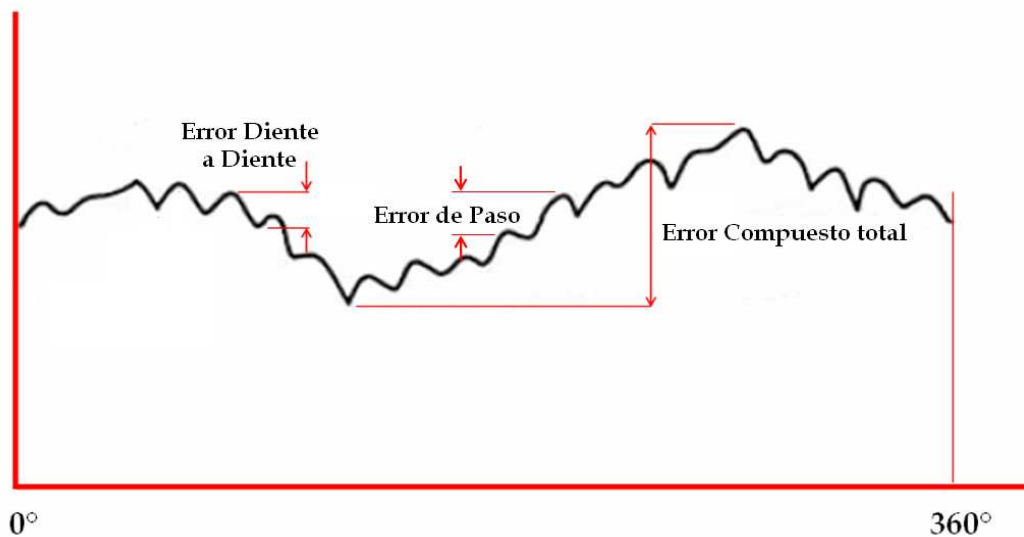
1.2.2.1. Inspección de Engranajes por Rodadura Tipo Monoflanco

En esta prueba, el engranaje a verificar se acopla con un engranaje patrón en una distancia entre centros apropiada con solamente un flanco de cada

engranaje en contacto, para medir el error en la transmisión en la dirección tangencial. La descripción detallada de esta prueba no se encuentra dentro del alcance del presente libro, se recomienda el estándar ANSI/AGMA 2015-1-A01 para mayor profundización sobre la misma.

En esta prueba los errores son evidenciados después de culminada una revolución del engranaje sometido a verificación; son destacados principalmente, el error compuesto diente a diente y el error compuesto total (Ver Figura 21).

Figura 21. Errores Presentes en la Prueba Monoflanco



Adaptada de: Design Unit Co

1.2.2.2. Inspección de Engranajes por Rodadura Tipo Doble flanco

Para poder realizar esta prueba, es necesario acoplar dos engranajes de forma firme, lo que produce el contacto en ambos flancos. Así, el nombre de este aparato de prueba es conocido como verificador de engranajes de doble flanco o “double flank gear tester” por su designación en inglés.

Una vez que el engranaje patrón y el engranaje de trabajo son acoplados adecuadamente y se hacen girar, la variación compuesta necesita ser recopilada. La variación, o error, puede verse supervisando la posición del engranaje patrón con un indicador comparativo de algún tipo ya sea mecánico o eléctrico (Figura 22). Los datos pueden capturarse entonces con un registrador de mapa de tira o para ser reunidos y analizados por medio de un computador.

Figura 22. Montaje Típico



Fuente: Precision Gage Co

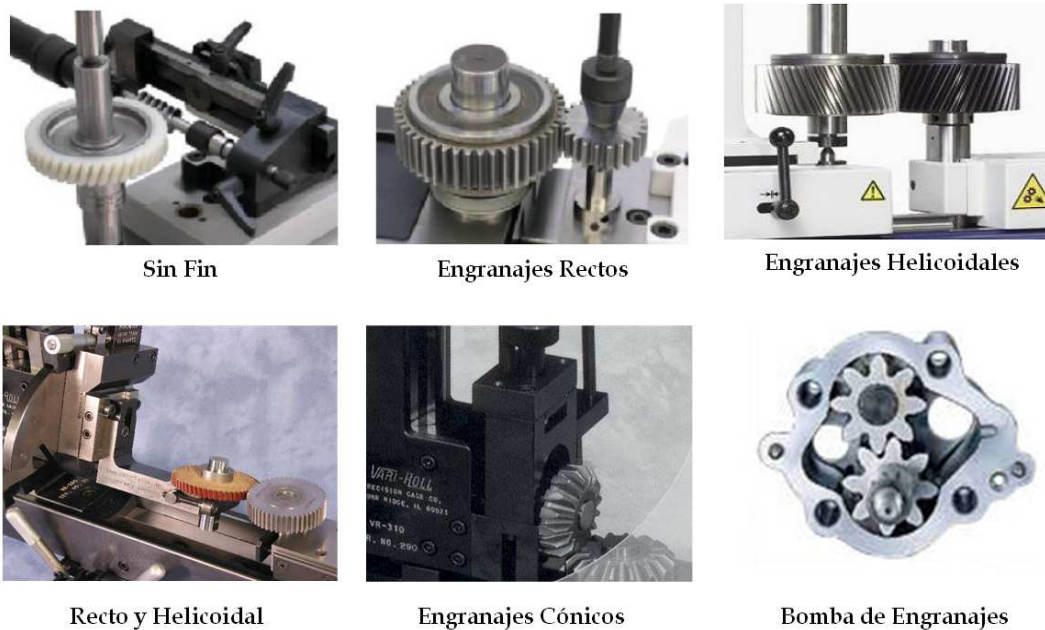
El método común para evaluar el error compuesto es con el registrador de mapa de tira. Cuando el aparato hace girar una revolución completa del engranaje de trabajo, es fácil de interpretar la variación compuesta total y la variación compuesta diente-a-diente.

El método de inspección de engranajes por rodadura tipo doble flanco es un método simple para comprobar la precisión funcional de un engranaje de

forma fácil y rápida. Sin importar que desviación tenga el engranaje de prueba, la inspección por rodadura tipo doble flanco la detectara. El resultado de la prueba es un error acumulado, es decir, la suma de todas las desviaciones dadas (F_i , f_i , f_e y f_r) las cuales se tratarán en el capítulo 2 del presente libro.

El dispositivo de medición de engranajes del tipo doble flanco, puede ser utilizado no solo en casos de revisión de calidad en engranajes de dientes rectos, sino en una amplia variedad de geometrías como son: sin fines, engranajes helicoidales, mezclas entre ellos y aplicaciones industriales como bombas de engranajes. (Figura 23).

Figura 23. Geometrías Involucradas en la Medición Tipo Doble Flanco

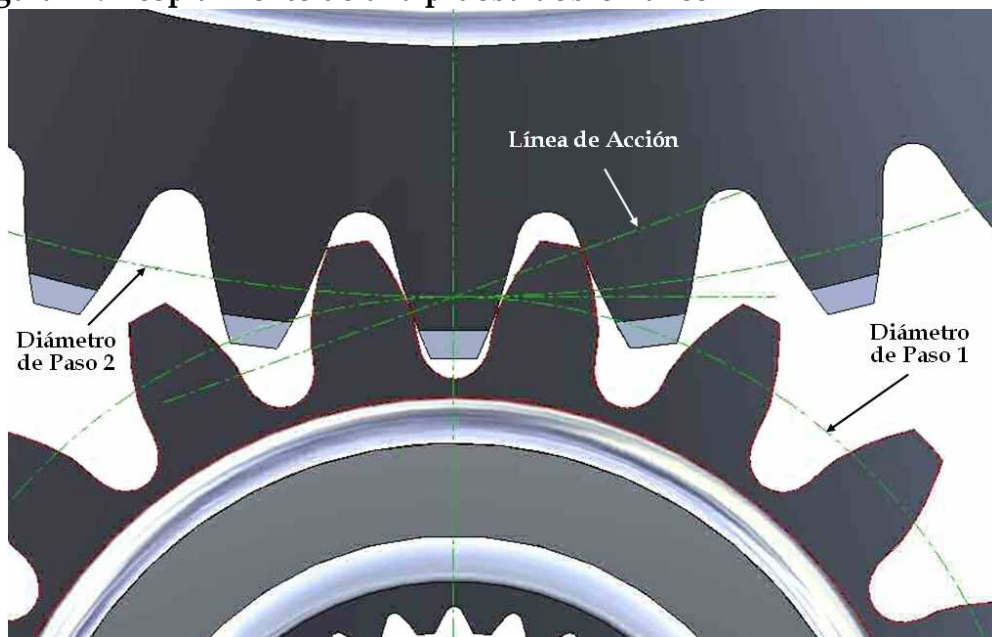


Fuente: FRENCO y Precision Gage Co

2. SISTEMA DE VERIFICACION DE ENGRANAJES RECTOS POR EL METODO DE RODADURA POR DOBLE FLANCO

La comprobación a un engranaje funcional, también conocido como la desviación radial total compuesta, es un método de evaluar el efecto total de errores del engranaje. Este método de prueba simula las condiciones bajo las cuales es probable que un juego de engranajes opere como resultado de su acoplamiento. La forma más común de esta prueba acopla los engranajes de forma firme, lo que produce el contacto en ambos flancos (Figura 24).

Figura 24. Acoplamiento de una prueba doble flanco



Fuente: Gear Co.

El uso de estos verificadores de engranajes se está volviendo más importante para la supervisión de la calidad en el corte de los mismos, debido a que los

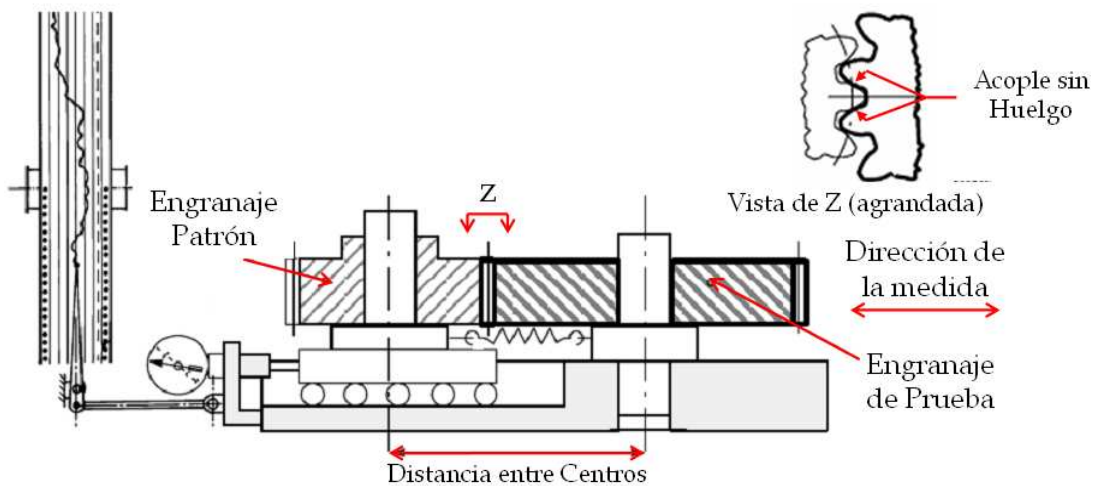
requisitos en las tolerancias y el mecanizado en el mercado de los engranajes metálicos y plásticos se están volviendo mas exigentes.

La elaboración de un verificador de engranaje de doble flanco es muy similar a construir cualquier otro tipo de dispositivo comparador, sólo que con este tipo de comparador, el patrón se mantendrá en el aparato como un elemento permanente en la vuelta de medición.

2.1. PRINCIPIO DE LA PRUEBA [5]

El procedimiento de verificación consiste en el montaje de un engranaje de prueba, sobre un husillo fijo de precisión; el engranaje patrón se monta entonces sobre una guía de deslizamiento provista con un resorte que permita a los engranajes estar sujetos radialmente en un acoplamiento cercano (Figura 25).

Figura 25. Esquema del Dispositivo de Verificación Radial Compuesta



Adaptada de: AGMA 915-2-A05

Debido a que las variaciones radiales entre el engranaje de prueba y el engranaje patrón son inevitables, su distancia entre centros se alterará cuando los dos engranajes rueden juntos en un firme acoplamiento. Este cambio refleja la acción compuesta total del engranaje que puede ser causada por imperfecciones en el perfil del diente, variaciones en el ancho, desgaste y errores de fabricación (o todas juntas). Los errores de acabado de superficie, mellas o arañazos en los dientes del engranaje también pueden contribuir para la variación de la distancia entre centros.

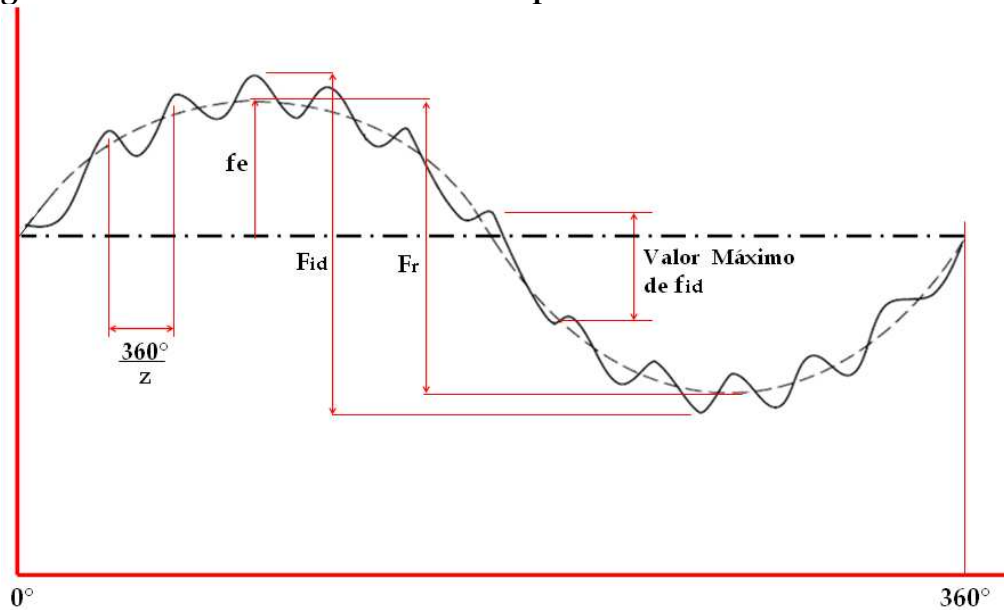
Las variaciones en la distancia entre centros que ocurren mientras los engranajes rotan juntos, son registradas. Esta grabación puede ser hecha manualmente mientras se observa un indicador digital, con una aguja en una carta, o electrónicamente. El sistema de adquisición de datos se tratara con mayor profundidad en el capítulo 5 del presente libro.

2.2. DESVIACIONES PRESENTES EN LA PRUEBA DOBLE FLANCO [5]

Las desviaciones del engranaje evaluadas en la prueba compuesta son: desviación compuesta diente a diente (f_{id}), desviación compuesta radial total (F_{id}). En ciertos casos, el descentramiento radial (F_r) también puede ser evaluado (Figura 26).

F_{id} es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la distancia entre centros, la cual ocurre durante una prueba compuesta radial (doble flanco), cuando el engranaje de prueba es rotado una revolución y sus flancos derecho e izquierdo están en contacto con los flancos correspondientes del engranaje patrón. (DIN3960/3963)

Figura 26. Curva de la Desviación Compuesta Radial



Adaptada de: AGMA 915-2-A05

f_{id} es el valor de la desviación radial compuesta, correspondiente a un paso ($360^\circ/z$), durante un ciclo completo de engranamiento de todos los dientes del engranaje del producto. (DIN3960/3963).

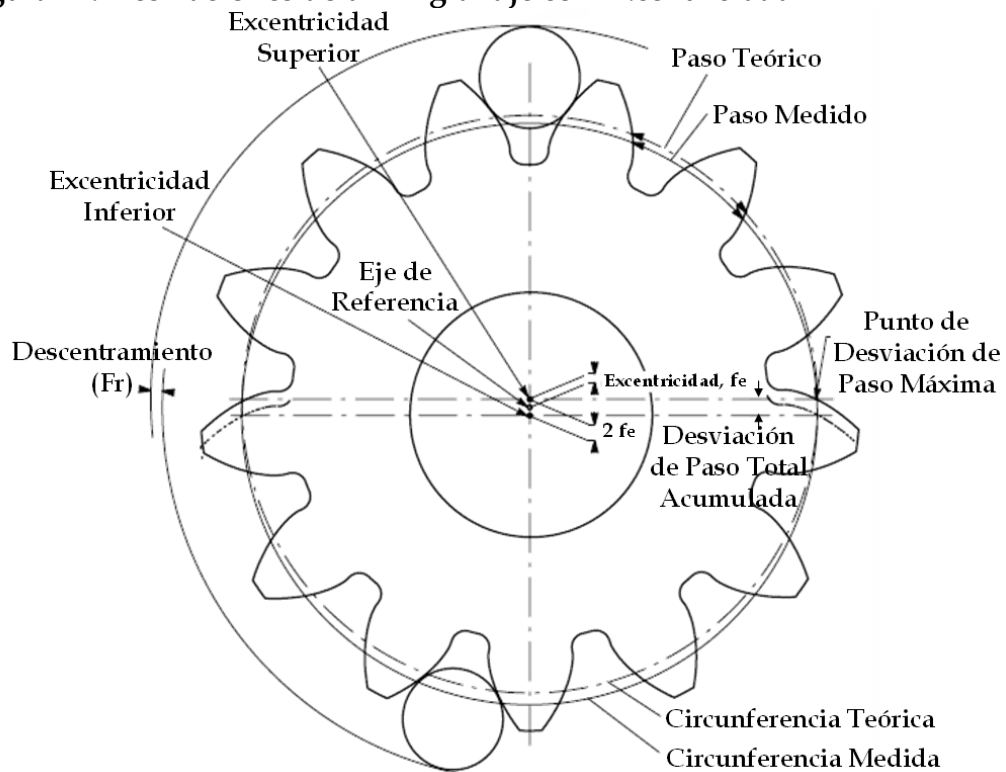
F_r es el valor del descentramiento radial del engranaje, es decir, la diferencia entre la máxima y la mínima distancia radial del eje del engranaje, según lo observado, quitando las desviaciones a corto plazo (ondulaciones del paso) y analizar la forma sinusoidal de la onda a largo plazo.

f_e es la desviación entre el eje geométrico y el eje de referencia, es decir, la excentricidad del engranaje. A menudo es el principal factor que contribuye al descentramiento radial y en algunas ocasiones, también puede ser ocasionada por la diferencia entre centros usados durante el corte y el

funcionamiento, por distorsiones en el montaje, o por una combinación de ambos (Figura 27).

Para la mayoría de los propósitos de la inspección, los engranajes de producción se prueban con un engranaje patrón. Los errores compuestos medidos incluyen siempre las desviaciones asociadas al engranaje patrón. Minimizar las desviaciones del engranaje patrón permite un mayor rango en la tolerancia para los errores en los engranajes de prueba.

Figura 27. Desviaciones de un Engranaje con Excentricidad



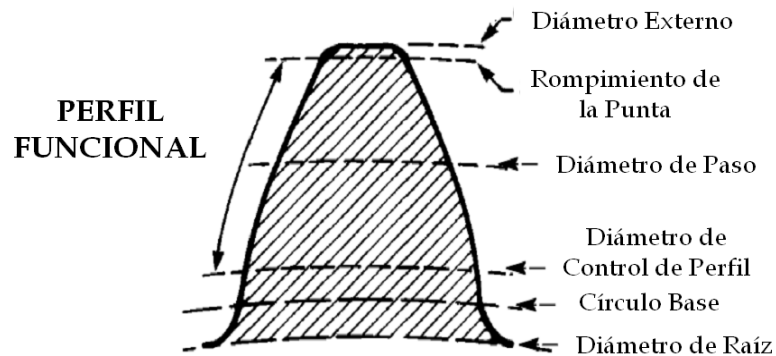
Adaptada de: AGMA 915-2-A05

Es importante observar que en el engranaje patrón, factores como la exactitud, el diseño y en especial, su contacto con el engranaje de prueba, pueden influenciar los resultados de la experiencia. Entonces, el engranaje patrón debe realizar un adecuado contacto con el perfil funcional del diente

del engranaje de prueba, pero en su montaje, no debe entrar en contacto con la raíz y la parte no funcional del diente (Figura 28).

Este sistema de medición también puede ser utilizado para medir el espesor del diente. El espesor del diente incluye los efectos de todas las variaciones en los dientes ya que la prueba compuesta radial mide cada diente del engranaje en una sola operación; su ventaja radica en que este método es mucho más rápido que realizar múltiples mediciones (una por cada diente) con otro método.

Figura 28. Perfil Funcional del Diente de un Engranaje Recto



Adaptada de: ANSI/AGMA 2015-1-A01

Sin embargo, este método se limita a los engranajes medianos y pequeños, puesto que las máquinas de prueba capaces de trabajar una distancia entre centros de más de 500 milímetros son escasas. En circunstancias especiales la prueba se puede lograr en el lugar de trabajo, después de la operación de corte.

Por otra parte, si el conjunto de errores detectados están dentro del rango de tolerancia, se asume también que los errores individuales están dentro de este

mismo rango. Si la desviación detectada por el método es muy grande (por fuera del rango), el estudio de la causa sería trabajo del operador, o el engranaje de prueba tendría que ser medido con otro dispositivo que pueda estar en facultad de determinar dichas desviaciones individuales.

Cuando este procedimiento es utilizado para evaluar la calidad de engranajes de precisión, la exactitud del engranaje principal y el procedimiento de medición utilizados, se debe convenir entre el fabricante y el comprador.

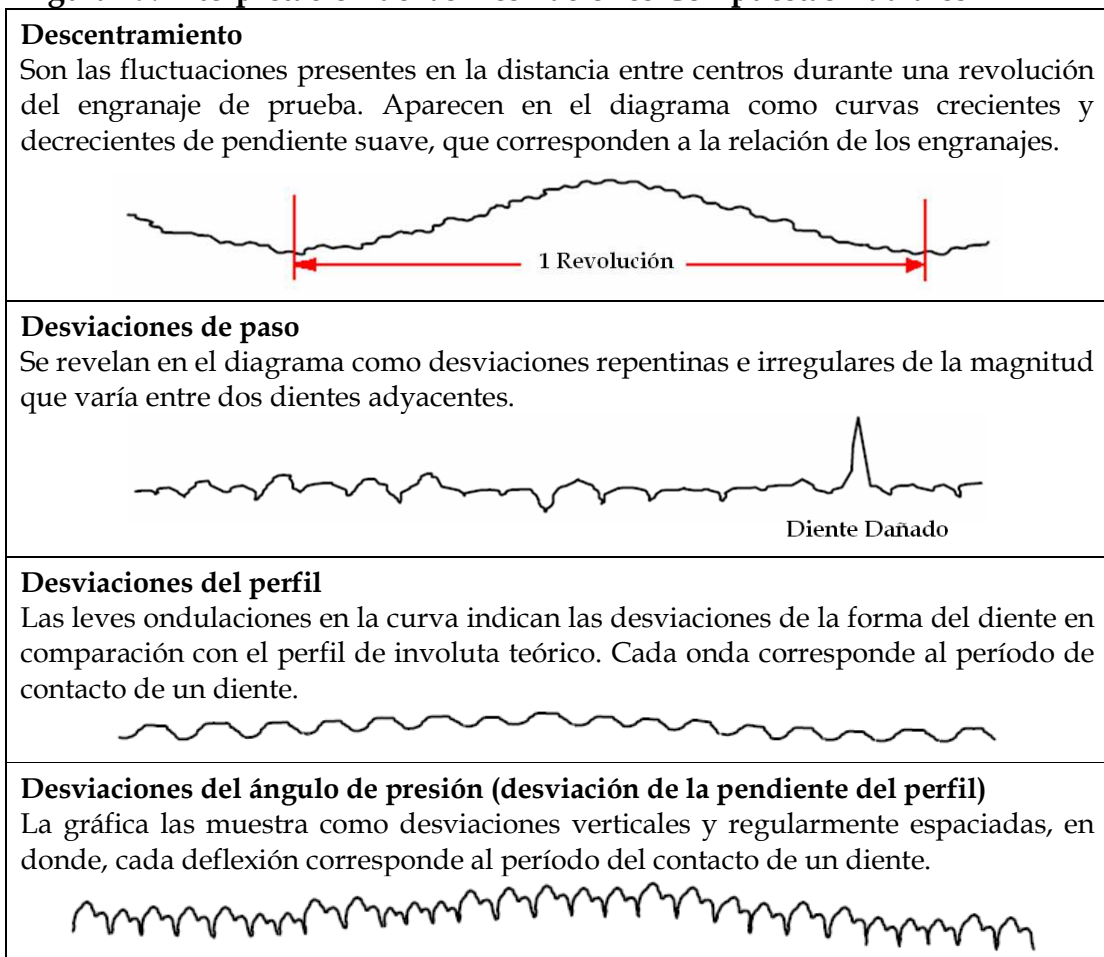
2.2.1. Interpretación Gráfica de los Resultados Presentes en la Prueba

Las desviaciones radiales compuestas incluyen componentes de las desviaciones de los flancos derechos e izquierdos combinados. Por lo tanto, la determinación de las desviaciones individuales de los flancos correspondientes no es factible. La medición de desviaciones radiales compuestas proporciona rápidamente la información en las deficiencias de la calidad relacionadas con la máquina de la producción, la herramienta, o la disposición (setup) del engranaje a ser evaluado.

El método se utiliza principalmente para la comprobación de grandes cantidades de engranajes, así como también para engranajes de paso fino. Las desviaciones compuestas tipo diente a diente que ocurren en cada incremento del paso tienden a indicar las desviaciones del perfil (a menudo desviaciones de la pendiente del perfil). Una gran y aislada desviación compuesta diente a diente puede indicar una gran desviación de paso o simplemente, un diente dañado (ver Figura 29).

Los cambios en la distancia entre centros del acoplamiento se obtienen por medio un reloj comparador digital, o por dispositivos de grabación que pueden graficar los resultados, los cuales, son trazos amplificados de la medición del desplazamiento radial de la desviación compuesta contra la rotación del engranaje de prueba. La figura 26 es una gráfica típica que demuestra el contenido de los datos para la desviación compuesta diente a diente y la desviación compuesta radial total.

Figura 29. Interpretación de las Desviaciones Compuestas Radiales



Adaptada de: AGMA 915-2-A05

Las desviaciones mostradas en la figura 29 incluyen los efectos de las desviaciones que existen tanto en el engranaje de prueba como en el engranaje patrón. Cuando se requiere, los resultados de las pruebas se deben reportar de acuerdo con:

Resultados de la desviación diente a diente: Estas desviaciones son obtenidas cuando el engranaje de prueba gira un ángulo de $360^\circ/z$. Esta prueba indica los valores que incluyen los efectos de perfil, paso, espesor y desviaciones de alineación del diente tanto en el engranaje de prueba como en el engranaje patrón.

No hay ningún modo práctico de restar las desviaciones causadas por el engranaje patrón a los valores registrados. Los valores de tolerancia permitidos para la desviación compuesta diente a diente son los valores máximos leídos de un reloj comparador digital o de una carta para cualquier segmento de $360^\circ/z$.

Resultados de la desviación compuesta radial total: Los resultados de la desviación compuesta radial total se obtienen cuando el engranaje de prueba gira por una revolución completa. Para compensar los efectos ocasionados por el engranaje patrón es necesario hacer lo siguiente:

- ✓ El valor de la desviación total radial compuesta, F_{id} , es la medida obtenida por el indicador;
- ✓ Obtener la desviación total radial compuesta, F_{id3} , del engranaje patrón (obtenida de la calibración);
- ✓ Determinar la tolerancia total radial compuesta, F_{idT} .

Luego,

Si $F_{id} \leq F_{idT} - F_{id3}$, el engranaje de prueba es aceptable. (Ec. 1)

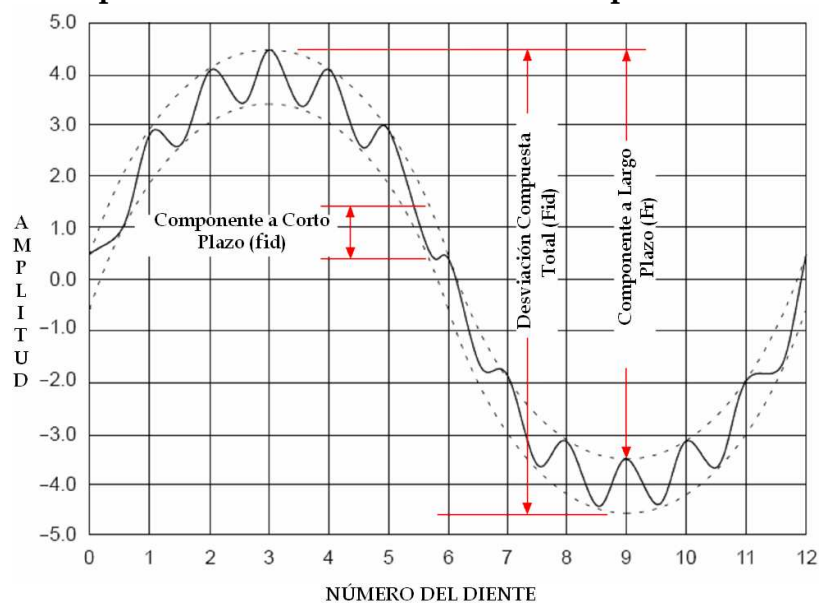
Si $F_{id} > F_{idT} + F_{id3}$, el engranaje de prueba es rechazado. (Ec. 2)

Si los resultados no cumplen con ninguna de las condiciones anteriores, es necesario repetir la prueba varias veces y tomar la lectura más alta de la desviación para comprobarla con la siguiente condición (Ec. 3):

Si $F_{id} \leq F_{idT} + F_{id3}$, el engranaje de prueba es aceptable. (Ec. 3)

Se puede hacer una interpretación manual de los resultados al trazar una curva que pase por los picos superiores y otra en los inferiores del diagrama. La curva superior es el componente a largo plazo (F_r) y la distancia vertical entre la curva superior y la inferior es el componente a corto plazo (f_{id}). Esto se demuestra en la figura 30.

Figura 30. Interpretación Manual de la Prueba Compuesta



Adaptada de: 915-2-A05

2.3. REQUISITOS DEL EQUIPO PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA PRUEBA [5]

Algunos de los aspectos cinemáticos y mecánicos básicos del equipo que influyen sobre las mediciones de la prueba compuesta son:

2.3.1. Descentramiento Mínimo o Cabeceo:

Se debe buscar que el engranaje patrón rote con un mínimo de descentramiento y desbalance lateral. Cualquier separación existente en el montaje, se verá reflejada en los resultados de la inspección.

2.3.2. Paralelismo de ejes:

El dispositivo se debe diseñar para mantener el engranaje de prueba en un eje de referencia que sea paralelo al eje del engranaje patrón. Algunos accesorios proporcionan medios para inclinar los ejes del engranaje patrón y del engranaje de prueba, en relación del uno con el otro. Tales accesorios deben traer la posibilidad para fijar adecuadamente el ángulo de inclinación y como ubicar la posición de cero con precisión.

2.3.3. Montaje:

La disposición que se debe realizar para el sostenimiento del engranaje de prueba en el dispositivo debe ser consecuente con el que se va a disponer durante el funcionamiento del mismo. Aunque no es esencial para la conducta de la inspección, el uso de estos montajes eliminará las diferencias

que se puedan presentar debido a los descentramientos radiales y laterales del montaje.

2.3.4. Cambios en la distancia entre centros:

Se debe realizar una disposición adecuada para indicar de forma exacta los cambios de distancia entre centros que ocurren durante la prueba. Esto se puede realizar por medio de un reloj comparador o de un dispositivo para efectuar la adquisición de datos. Es esencial que estos dispositivos para la adquisición de datos tengan una adecuada precisión para el rango de medida estipulado.

2.3.5. Mantener un adecuado acoplamiento:

Se debe ajustar la fuerza que mantiene los engranajes de prueba y patrón acoplados de forma correcta. Esta fuerza debe ser uniforme sobre toda la escala de lectura que puede realizarse por medio de un resorte.

2.3.5.1. Sistema de Sujeción por Medio de Resorte

La función principal del resorte es la de mantener un adecuado contacto entre los flancos durante toda la prueba, además, la cantidad de carga aplicada o de peso muerto (masa) del resorte es importante al momento de realizar la prueba. La carga excesiva en los engranajes de diente fino, o engranajes hechos de materiales suaves, o en el clásico tipo de engranajes que tienen ejes delgados, dará lugar a lecturas incorrectas causadas por la desviación de los dientes o del mismo eje del engranaje.

Por otro lado, una carga ligera, también dará lugar a lecturas incorrectas, debido a desviaciones en el contacto entre el engranaje de prueba y el engranaje patrón.

Las cargas recomendadas entre el engranaje de prueba y el engranaje patrón se basan en el tamaño del diente, y se dan en la Tabla 1.

Tabla 1. Cargas recomendadas para engranajes metálicos

Rango del Módulo	Carga ¹ , [kg]	Diámetro de paso equivalente	Carga ¹ [oz]
0.20 a 0.25	0.1 a 0.2	100 a 120	3 a 5
0.25 a 0.30	0.1 a 0.2	80 a 99	3 a 5
0.30 a 0.40	0.3 a 0.4	60 a 79	6 a 10
0.40 a 0.50	0.5 a 0.6	50 a 59	13 a 19
0.50 a 0.60	0.6 a 0.7	40 a 49	17 a 23
0.60 a 0.80	0.7 a 0.8	30 a 39	21 a 27
0.80 a 1.25	0.8 a 1.0	20 a 29	25 a 31
1.25 a 2.5	0.9 a 1.1	10 a 19	29 a 35
2.5 a 25	1.0 1.2	1 a 9	33 a 39

Nota:
1) Para engranajes no metálicos utilizar ½ del valor citado.

Adaptada de: 915-2-A05

2.3.6. Otras Consideraciones:

Las características adicionales que contribuyen a la comodidad de uso y a la exactitud en los resultados son:

- * Asegurar la distancia entre centros de forma rápida y exacta.
- * Realizar el movimiento de los engranajes a baja velocidad para reducir la posibilidad de impercepciones de los errores y para tener un manejo más fácil del engranaje patrón.
- * Proteger el equipo contra los contaminantes y el daño accidental.

* Contar con bases sólidas, ambiente de temperatura controlada y estar libres de polvo, son requisitos para la medida de engranajes de exactitud extrema.

2.4. ENGRANAJES PATRÓN [5]

El engranaje patrón utilizado para inspeccionar el engranaje de prueba es justo como cualquier otro de su clase, el cual, debe ser fabricado a un nivel de calidad considerablemente más alto que el de prueba. Las tolerancias del engranaje patrón definen la variación máxima para los errores totales y de diente a diente (Tabla 2).

Tabla 2. Tolerancias para Engranajes Patrón (Modulo entre 0.2-2.5)

DESVIACIONES	INTERVALOS	M1R (μm)	M2R (μm)
f_{id}	$0.2 \leq m \leq 1.25 \wedge d \leq 60\text{mm}$	1.5	2.5
	$1.25 < m \leq 2.5 \vee d > 60 \text{ mm}$	4.0	5.0
F_{id}	$0.2 \leq m \leq 1.25 \wedge d \leq 60\text{mm}$	2.5	5.0
	$1.25 < m \leq 2.5 \vee d > 60\text{mm}$	8.5	12.0

NOTA:
Para engranajes patrón con menos de 20 dientes, verificar con el fabricante su uso y calibración.

Fuente: ANSI/AGMA 2015-2-A06

Los engranajes patrón utilizados para la inspección compuesta pueden ser clasificados de la siguiente forma:

- Un engranaje patrón estándar de tamaño y diámetro exterior conocidos que se puede utilizar para examinar diversos engranajes del mismo paso circular o módulo. Se deben tomar precauciones para asegurar que los engranajes no sean rechazados cuando se presente una profundidad excesiva en el contacto entre sus dientes producida por un engranaje patrón de diámetro exterior de gran tamaño. Similarmente, se debe tratar de evitar la posibilidad de aceptar

los engranajes con una profundidad corta del perfil funcional cuando el engranaje patrón tiene un diámetro exterior de tamaño insuficiente.

- Un engranaje patrón diseñado específicamente para examinar la desviación compuesta de un engranaje de prueba. Esto normalmente asegurara la inspección apropiada y completa.

- Un engranaje de acoplamiento seleccionado de calidad conocida, que se debe decretar de acuerdo al grado de inspección completa mediante cálculo y calibración.

2.4.1. Designación del número de grado

La nomenclatura de los engranajes patrón es designado por su número de grado y prefijado por la letra *M* (de master en ingles), obteniendo así *el número de grado del engranaje patrón*; como sufijo, pueden añadirse las letras, *T* o *R*, para señalar el método por el cual fue establecido el grado de dicho engranaje.

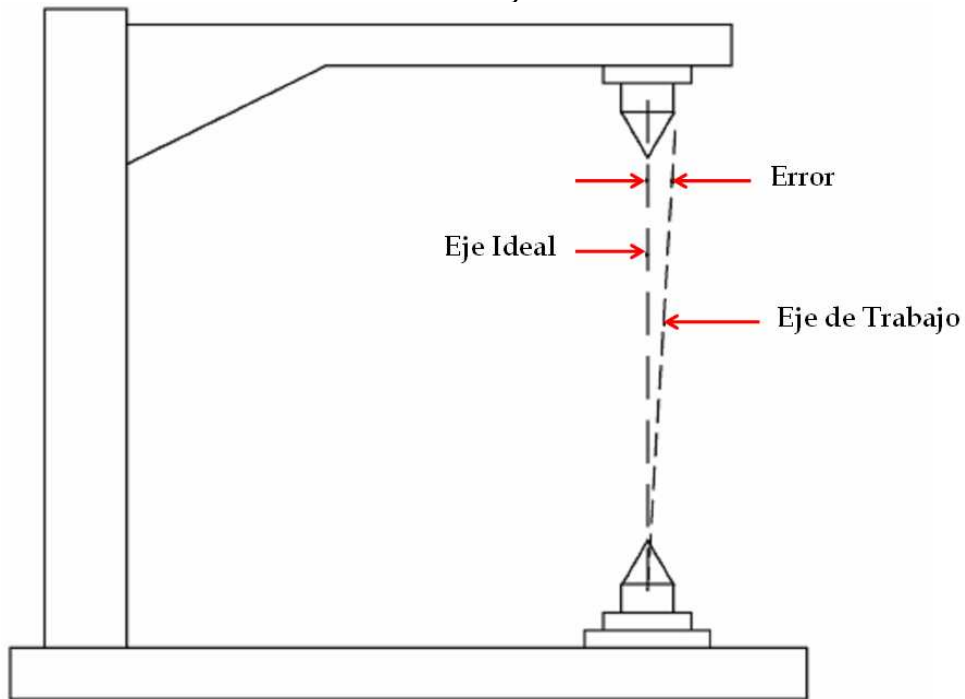
La letra *T* es para las tolerancias elementales y la letra *R* para las tolerancias compuestas radiales. Ejemplo: Engranaje M2R. Cuando ya se ha establecido el grado del engranaje patrón (con sus tolerancias elementales y radiales), el sufijo cambia a *RT*, quedando así como engranaje M2RT, indicando que el grado de dicho engranaje es 2.

2.5. CALIBRACIÓN

Muchos factores afectan la exactitud en los instrumentos de medición de engranaje. Estos incluyen la rectitud y paralelismo en el sistema de guías del

instrumento, errores de posicionamiento lineal (Figura 31) y errores de movimiento angulares de los componentes en movimiento del instrumento.

Figura 31. Error de Alineamiento en el eje de Rotación

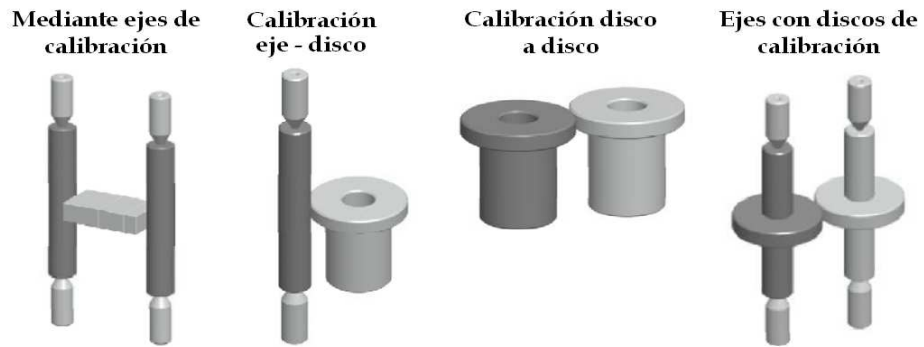


Adaptada de: AGMA 931-A02

Los errores causados por componentes electrónicos, balanza (escalas), mandos, y el software también pueden afectar la exactitud del instrumento de medición. Discutir sobre mandos electrónicos está fuera del alcance de este documento, sin embargo, se le recomienda a los usuarios de estos instrumentos, que sean conscientes que muchas fuentes posibles de inexactitud pueden ser provenientes de los mismos.

Si la distancia real entre ejes va a ser medida, es necesario calibrar la máquina con una distancia entre ejes conocida. La manera correcta de hacerlo consiste en utilizar ejes, discos y/o galgas de calibración (Figura 32).

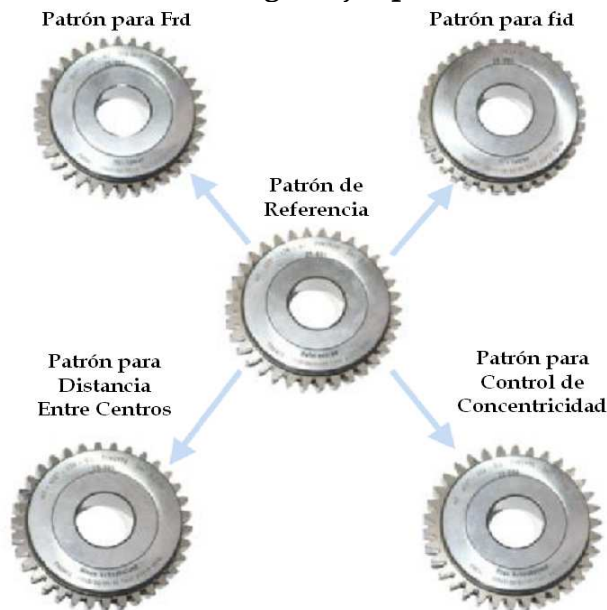
Figura 32. Sistemas de calibración de la distancia entre centros



Fuente: FRESCO CORPORATION

Para la calibración de los demás errores, es posible utilizar 2 (o más) engranajes patrones para dicho control, en donde se preferiría la utilización de un engranaje patrón para cada error y de un engranaje extra para la calibración de los patrones, el cual, se reservará exclusivamente para este uso (Figura 33).

Figura 33. Calibración mediante engranajes patrones



Fuente: FRESCO CORPORATION

2.6. RELACIÓN ERROR-CALIDAD

Las cantidades permisibles de variación en la forma real de los dientes, respecto de la forma teórica, se especifican en la AGMA como un número de calidad. Las cartas detalladas, proporcionadas para las tolerancias en muchas propiedades, se incluyen en la norma *AGMA 2000-A88 Gear Classification and Inspection Handbook, Tolerances and Measuring Methods for Unassembled Spur and Helical Gears* (Manual de clasificación e inspección de engranes, tolerancias y métodos de medición para engranajes rectos y helicoidales).

Los números de calidad van del 5 al 15 y son designados con la letra Q; donde la mayor precisión corresponde al número mayor. Este tipo de notación ya fue sustituido tanto en el sistema ISO como en la misma AGMA, sin embargo, algunos autores e industrias la continúan utilizando, razón por la cual, es mencionada en el presente libro.

La exactitud en el sistema de medición compuesta radial maneja para las desviaciones totales y diente a diente rangos y notaciones diferentes, en donde, según la *AGMA 2015-2-A06 Accuracy Classification System - Radial Measurements for Cylindrical Gears* (Sistema de Clasificación de exactitud, Mediciones radiales en engranajes cilíndricos) se utilizan nueve grados, que van desde el C4, el cual es el más preciso (tolerancia más pequeña), hasta el C12, el cual es el de menor precisión (tolerancia más grande).

Se aprecia entonces la principal diferencia entre la notación reciente y la antigua, que consiste en la inversión de los grados, es decir, en la norma AGMA 2000-A88 los números mayores indican más precisión, mientras que en ISO y AGMA recientes, muestran la precisión más baja (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación del Grado de Exactitud según el Error Permisible [μm]

GRADOS DE EXACTITUD			ERROR PERMISIBLE	
AGMA 2000A-88	JIS	AGMA 2015-2-A06	COMPUESTA DIENTE A DIENTE	COMPUESTA TOTAL
Q15	--	--	--	--
Q14	--	--	--	--
Q13	0	C4	1.12m + 3.55	(1.4W + 4.0) + 0.5 (1.12m + 3.55)
Q12	1	C5	1.6m + 5.0	(2.0W + 5.6) + 0.5 (1.6m + 5.0)
Q11	2	C6	2.24m + 7.1	(2.8W + 8.0) + 0.5 (2.24m + 7.1)
Q10	3	C7	3.15m + 10.0	(4.0W + 11.2) + 0.5 (3.15m + 10.0)
Q9	4	C8	4.5m + 14.0	(5.6W + 16.0) + 0.5 (4.5m + 14.0)
Q8	5	C9	6.3m + 20.0	(8.0W + 22.4) + 0.5 (6.3m + 20.0)
Q7	6	C10	9.0m + 28.0	(11.2W + 31.5) + 0.5 (9.0m + 28.0)
Q6	7	C11	12.5m + 40.0	(22.4W + 63.0) + 0.5 (12.5m + 40.0)
Q5	8	C12	18.0m + 56.0	(45.0W + 125.0) + 0.5 (18.0m + 56.0)

Adaptada de: ELEMENTS OF METRIC GEAR TECHNOLOGY

donde:

$$W = \sqrt[3]{d} + 0.65m \quad (\mu m)$$

d = Diámetro de paso (mm)

m = Módulo

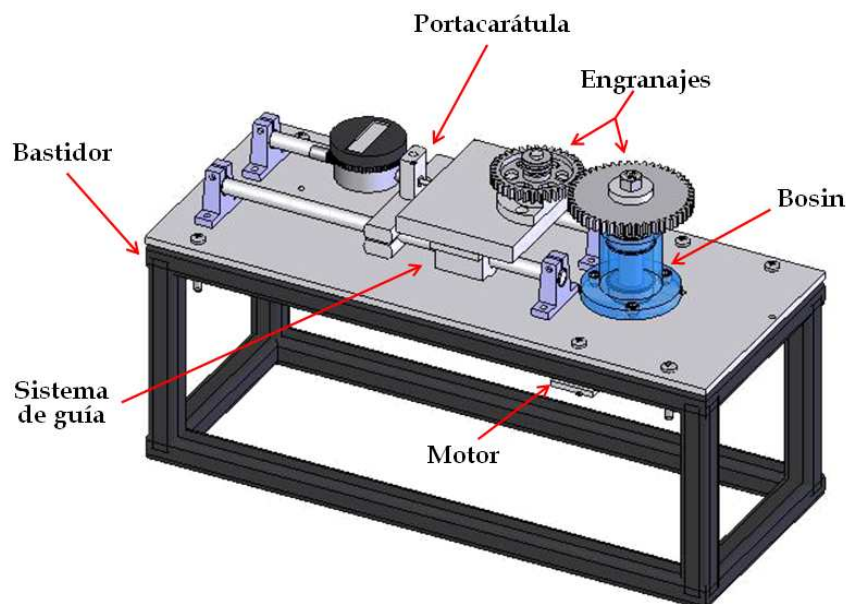
Vemos entonces que existe un amplio rango de valores para definir la exactitud de un engranaje, es solo cuestión de definir los errores mediante el uso del dispositivo de medición y comparar con el error permisible en dicho rango, para así determinar el grado de exactitud al que pertenezca dicho engranaje.

3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL BANCO

A continuación son descritos los sistemas principales que componen la el dispositivo, se procede a realizar el respectivo proceso de diseño, selección y verificación de cada componente, con el fin de obtener las dimensiones óptimas de los mismos basadas en las cargas que soporta cada uno; para llevar a cabo este proceso, son descritos además, los parámetros de funcionamiento del dispositivo.

Los componentes del banco experimental pueden ser agrupados de la siguiente forma: sistema de guía, bastidor, bosin del engranaje de prueba, motor, los engranajes y el portacarátula (Figura 34).

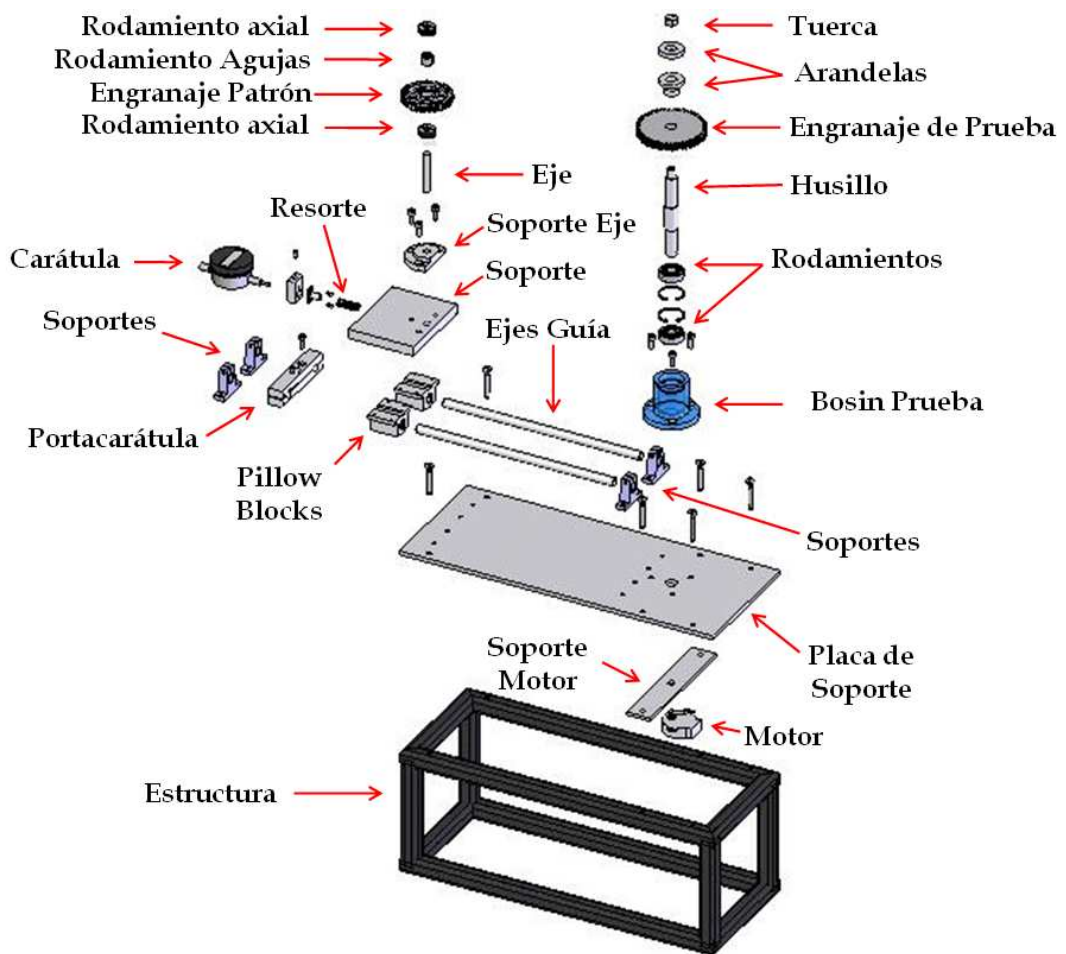
Figura 34. Componentes Principales del Dispositivo



Fuente: Propia

Dentro de la clasificación previamente establecida, existen también ciertos elementos (Figura 35), que en su totalidad conforman el dispositivo de medición.

Figura 35. Parámetros principales (vista explosionada)



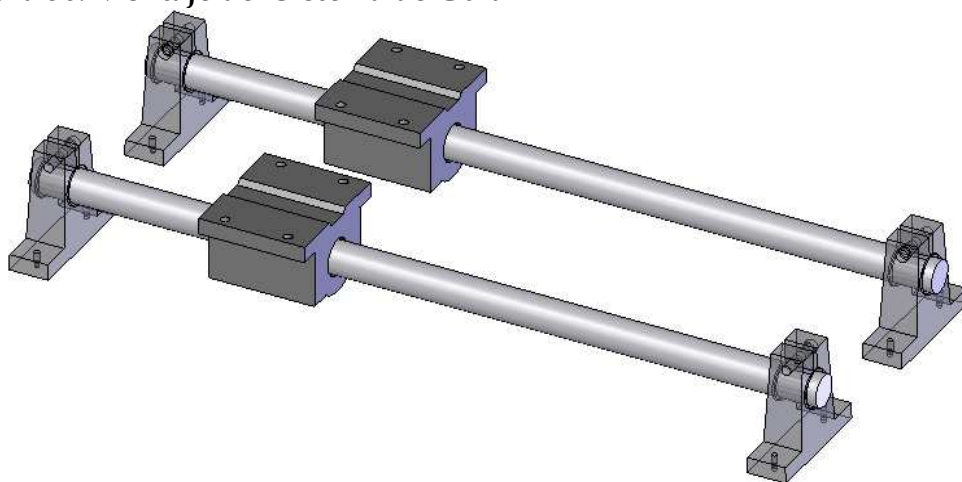
Fuente: Propia

3.1. SISTEMA DE GUÍA

Denominamos como sistema de guía a los componentes que se encargan del soporte y alineación del sistema, como son: cuatro soportes, dos pillow blocks, dos ejes y la bandeja de soporte.

Una adecuada alineación y un bajo coeficiente de fricción son requeridos para evitar que los resultados en las mediciones sean afectados, ya que los rangos de medida son muy pequeños (micras), es necesario entonces la utilización de rodamientos de bolas recirculantes, debido a que son los adecuados para el desplazamiento lineal y que cumplen con los requisitos citados anteriormente. Se ilustra el montaje en la Figura 36.

Figura 36. Montaje del Sistema de Guía



Fuente: Propia

Estos rodamientos seleccionados vienen con montados dentro de una carcasa, por lo cual se conocen como **Super Smart Ball Bushing Pillow Blocks**, presentando las siguientes características:

- ✓ Un dispositivo de auto alineación universal, que compensa la desalineación del eje, optimiza la distribución de carga entre la bolas recirculantes y asegura una carga uniforme que sobre la longitud entera del plato del rodamiento. El tiempo y el costo de instalación se reducen mientras el funcionamiento y la vida del rodamiento es maximizada.
- ✓ Un diseño tecnológicamente avanzado que permite al rodamiento mantener su montaje diametral cuando es instalado en una carcaza que es ligeramente ovalada.
- ✓ Un coeficiente de fricción de 0.001. Esto permite el empleo de motores más pequeños, más económicos, correas, engranajes y tornillos de bolas, debido a la disminución de la fricción.
- ✓ Hasta seis veces la capacidad de carga o 216 veces la vida de rodamientos convencionales lineales.

3.1.1. Evaluación de Cargas

Los ejes de guiado están sometidos a la flexión producida por la carga transmitida a través de los rodamientos, debido a la acción de las masas de la mesa de soporte, el husillo y el engranaje patrón. Debido a que la mesa deslizante tendrá desplazamientos del orden de micras ($1 * 10^{-6}$ m), serán despreciadas las inercias y el análisis dinámico referente a dicho movimiento. Además se considerará el escenario más crítico posible, en el cual se trabaja con el engranaje patrón de mayor masa.

Las masas de los respectivas partes son:

Masa del engranaje patrón: 125 g

Masa del eje: 70 g

Masa de la placa de soporte: 1310 g

Masa del soporte: 150 g

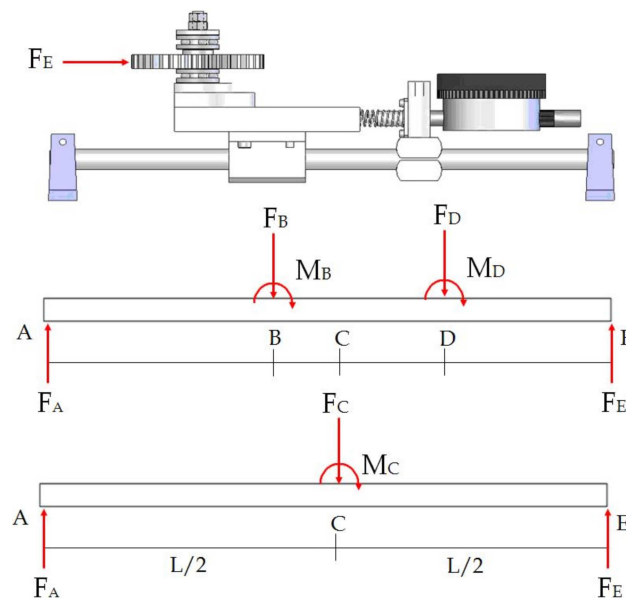
Masa de cada Pillow Block: 150g

3.1.1.1. Análisis estático

Después de calculadas las cargas, se procede a ubicar éstas sobre el eje, y calcular las reacciones sobre los rodamientos. Este será el criterio para la selección de los diámetros de los ejes y los rodamientos.

La distribución de las cargas se analizó para el punto de mayor criticidad para el sistema de guiado, el cual ocurre cuando el rodamiento se encuentra en el centro del eje según lo ilustrado en la Figura 37.

Figura 37. DCL del Sistema de Guía



Fuente: Propia

La fuerza y los momentos en los puntos B y D son producidos en los diferentes componentes que afectan al sistema de guía, para lo cual se tendría entonces: $F_B = 2\text{Kg}$, $F_D = 1\text{kg}$, $M_B = 0,715\text{Nm}$, $M_D = 0,715\text{Nm}$. Por modelamiento en CAD, la geometría de los centros de masa B y D son determinadas, permitiendo entonces el cálculo de la fuerza resultante en el punto C, el cual, está en el centro de la barra.

Las respectivas ecuaciones quedarían de la siguiente forma:

$$F_C = F_B + F_D \quad [\text{Ec. 4}]$$

$$M_C = M_B + M_D - F_B(BC) - F_D(CD) \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$\sum M_A = F_C \frac{L}{2} - M_C - F_E L = 0 \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$F_Y = F_A - F_E - F_C = 0 \quad [\text{Ec. 7}]$$

Resolviendo el sistema, en cada punto representativo del eje se tendrá:

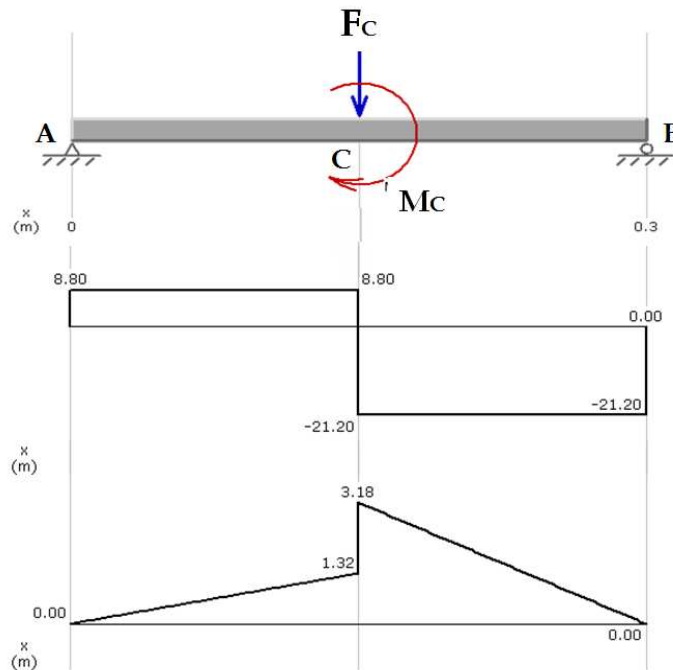
$$F_A = 22,3 \text{ N} \quad ; \quad F_E = 7,7 \text{ N} \quad ; \quad M_C = 1,86 \text{ Nm}$$

Teniendo el valor de estas fuerzas y el momento que actúan sobre el eje, el diagrama de cortante y momento quedaría de la siguiente forma (Figura 38):

Para determinar el diámetro de los ejes, se hace la siguiente comparación:

$$\frac{32M}{\pi d^3} \leq \sigma_{adm} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Figura 38. Diagrama de Cortante y Momento para el eje



Fuente: Propia

Obteniendo como resultado un diámetro de 4.52 para tal fin. Debido a que no es un diámetro estandarizado, se selecciona el diámetro que más se acerca a éste según la casa fabricante THOMSON, el cual, es de $\frac{1}{2}$ pul.

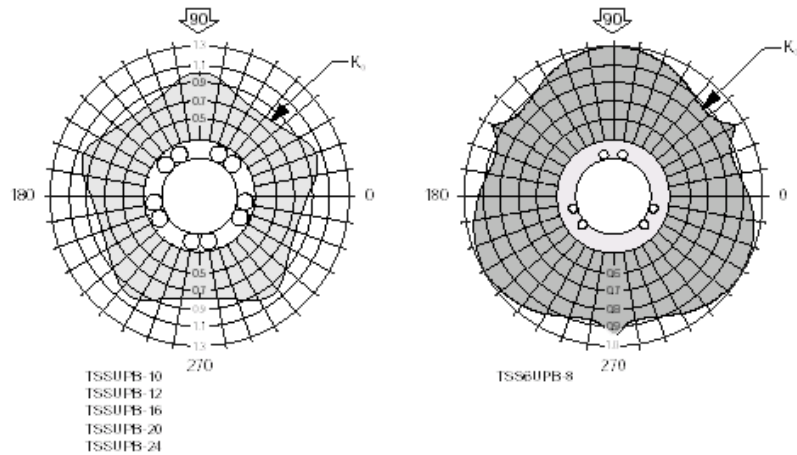
3.1.1.2 Selección de los Rodamientos Lineales y Soportes:

La selección de los rodamientos se hace basándonos en el DCL anterior (Figura 37), para la determinación de las cargas de trabajo durante el funcionamiento del dispositivo. La casa fabricante Thomson suministra dos gráficos para la selección de este tipo de rodamientos, el primero (Figura 39), sirve para determinar el factor de corrección de la capacidad de la carga dinámica y el segundo (Figura 40), requiere la carga en el punto más crítico del rodamiento. Para lo anterior, el fabricante argumenta que:

$$\text{Carga en el punto más cargado del rodamiento} = \frac{\text{Máxima carga aplicada}}{K_0} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Al evaluar una carga aplicada a 90° el factor dinámico K_0 tendría el valor de 1.

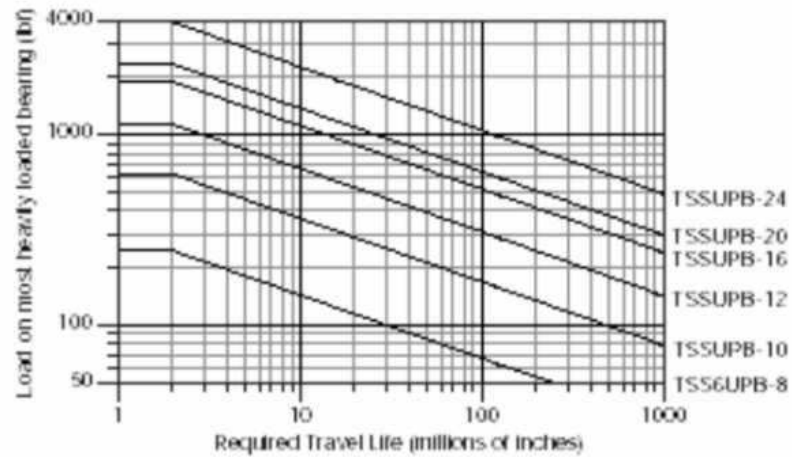
Figura 39. Factor de Corrección de la Capacidad de la Carga Dinámica



Fuente: Thomson Inc.

Como se puede apreciar en la Figura 40, es solo cuestión de interceptar la curva con los datos necesarios para la selección, sin embargo, debido a que los desplazamientos a los que estarán sometidos los rodamientos lineales son muy pequeños y a que la carga aplicada es muy pequeña, no cumplen los requisitos mínimos de la gráfica, lo que haría necesaria una extrapolación, para lo cual entonces optamos por seleccionar el rodamiento cuyo punto de intersección sea el origen.

Figura 40. Gráfico de Carga vs. Vida Requerida para los Rodamientos Lineales



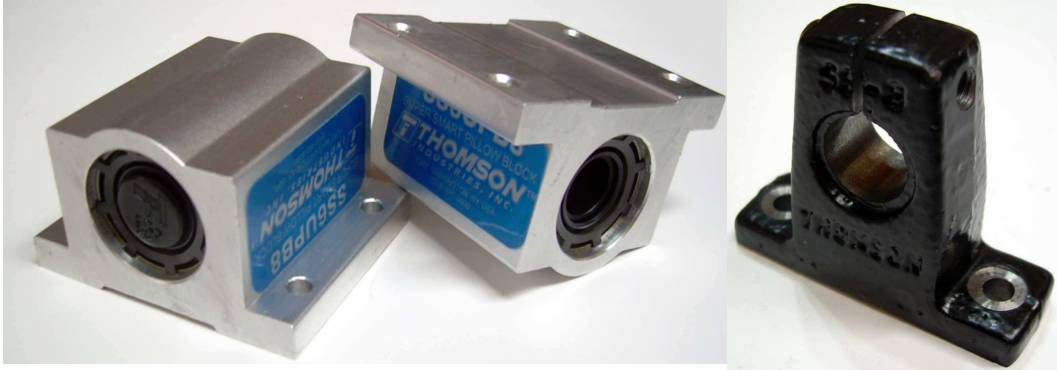
Fuente: Thomson Inc.

Lo anterior, nos conduce a las características finales del sistema de posicionamiento lineal:

- ✓ Marca: Thomson, modelo TSS6UPB-8
- ✓ Diámetro: 0,5 pulg

La selección del soporte adecuado viene ligada al diámetro de los ejes, el cual, debe ser el mismo que el de los rodamientos, por lo tanto, tendremos soportes de 0,5 pul (Figura 41), también de la casa fabricante THOMSON.

Figura 41. Super Smart Ball Bushing Pillow Block (izquierda) y Soporte de los Ejes Guía (derecha)



Fuente: Propia

3.2. BASTIDOR

El bastidor se compone de un conjunto de perfiles de sección cuadrada de 1" x 1" calibre 16 y de una placa de acero estructural A-36 de 1/4" de espesor, a la cual se le realizó un planeado para garantizar una adecuada linealidad (Figura 42).

Figura 42. Bastidor



Fuente: Propia

3.3. BOSIN DEL BASTIDOR

Un bosín es una estructura de soporte comúnmente utilizada en el sistema de frenos de los automóviles, que en nuestro caso, consiste de un cilindro que soporta dos rodamientos para garantizar linealidad de movimiento del eje sin perder potencia durante su transmisión; dicho soporte se realiza con la ayuda de dos chavetas flexibles (Ver gráfico 43).

Figura 43. Bosin de soporte al engranaje de prueba



Fuente: Propia

3.3.1. Selección de los rodamientos [13]

Cuando un rodamiento funciona a velocidades muy bajas, su capacidad para soportar cargas no viene dada por la fatiga del material, sino por la deformación permanente generada en los puntos de contacto y los caminos de rodadura (carga estática).

El coeficiente estático básico de la carga C_0 , es utilizado en el cálculo de rodamientos que giran a bajas velocidades, que están sujetos a pequeños

movimientos oscilantes ó cuando se encuentran estacionarios bajo carga durante ciertos períodos; en la tabla 4 se citan los diversos criterios para la selección de dichos rodamientos. La carga estática equivalente P_0 esta dada por la siguiente ecuación:

$$P_0 = (X F_R) + (Y F_a) \quad [\text{Ec. 10}]$$

Los valores basados en la experiencia para el factor de seguridad estático (s_0) y los factores radial y axial para rodamientos de bolas y rodillos de diferentes tipos de operación y requerimientos en cuanto a funcionamiento suave están dados en tablas (ver Anexo B).

Tabla 4. Resultados proceso de selección rodamiento de bolas

Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
n	6,0	rpm	Rotación eje
X	0,6	N/A	Factor para carga radial
Y	0,5	N/A	Factor para carga axial
Fr	1,0	Kg	Carga Radial
Fa	0,535	Kg	Carga Axial
e	0,31	Kg	
v	1,0	N/A	Factor de Rotacion
So	0,5	N/A	Factor de seguridad estático
Po'	0,87	Kg	Carga Estática Equivalente (sin corrección)
Po	1	Kg	Si $Po' < Fr$, entonces: $Po = Fr$
Co	500	g	$Co = So * Po$

Fuente: propia

Al final de este proceso, además del requerimiento de fuerza se necesitó cumplir con los requerimientos geométricos del rodamiento para lo cual cumple la referencia SKF 6202 (Figura 44).

Figura 44. Rodamientos de bolas (Ref. SKF 6202)



Fuente: Propia

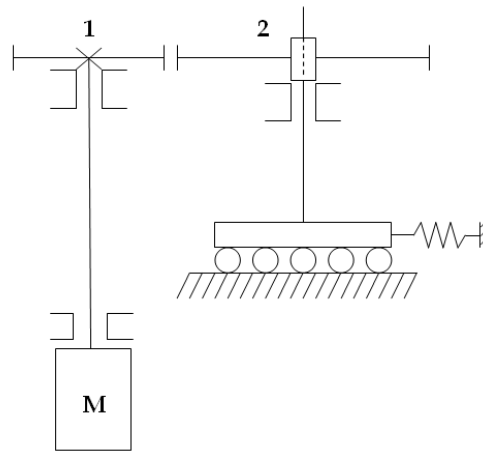
3.4. MOTOR

Para realizar una prueba de forma favorable, es necesario realizarla a baja velocidad para así evitar que la inercia del mecanismo afecte dichos resultados (6 rpm). Para la selección del motor es utilizado como criterio de selección el torque de arranque; el cual, para efectos prácticos se define como:

$$T_a = T_i + T_f \quad [\text{Ec. 11}], \text{ donde: } \begin{array}{l} T_a = \text{Torque de Arranque} \\ T_i = \text{Torque de inercia} \\ T_f = \text{Torque de fricción} \end{array}$$

Para el cálculo de la inercia, es necesario tener presentes las inercias relativas asociadas a la transmisión en el motor con los sistemas de engranajes, como es ilustrado a continuación (Figura 45):

Figura 45. Representación ilustrativa del montaje para el cálculo inercial.



Del esquema se observa que:

$$I_T = I_1 + I_2^{(1)} \quad [\text{Ec. 12}]$$

donde:

I_1 = Inercia del engranaje de prueba

I_2 = Inercia del engranaje patrón

$$\therefore I_T = m_1 r_1^2 + \frac{\omega_2^2 m_2 r_2^2}{\omega_1^2} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Reemplazando tenemos que $I_T = 684500 \text{ gr mm}^2$

Por lo tanto, $T_i = 68.45 \times 10^{-7} \text{ N m}$

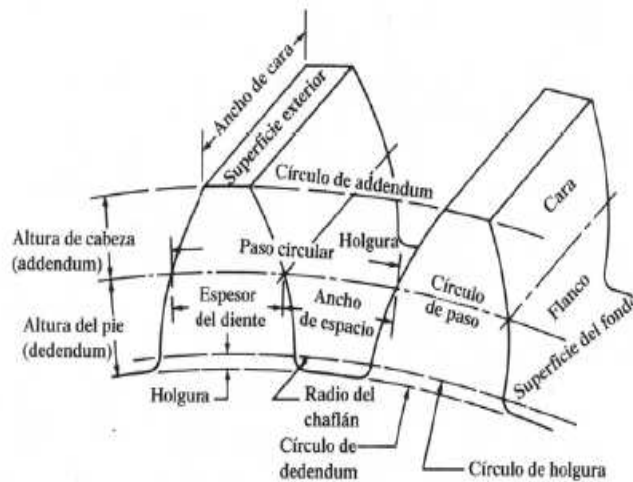
Cabe también señalar, que se utilizara un sistema óptico con el fin de sincronizar el encendido/apagado del motor eléctrico, esto seria, para evitar tener dichas operaciones de forma manual y así contar con una forma más sincronizada de controlar las vueltas. Dicho sistema es muy sencillo, consta de una pestaña solidaria al eje del bosin de prueba la cual, al interrumpir la señal del sensor apagara el motor instantáneamente (se profundizara mas sobre el control de este sistema en el capítulo 5).

3.5. ENGRANAJES

En este dispositivo, los engranajes se utilizan solo para transmitir movimiento y no para la transmisión de potencia, por lo tanto, discriminamos el análisis de fuerzas y de resistencia de materiales referente a los mismos, para darle preponderancia a los parámetros que influyen durante la prueba, como son la forma del diente y su proceso de mecanizado.

El paso de los dientes del engranaje determinan su tamaño, y dos engranajes en contacto, deben tener el mismo paso ya que de lo contrario no engranarían adecuadamente, además, éste controla la distancia entre dientes adyacentes (Figura 46).

Figura 46. Características de los dientes de los engranajes rectos



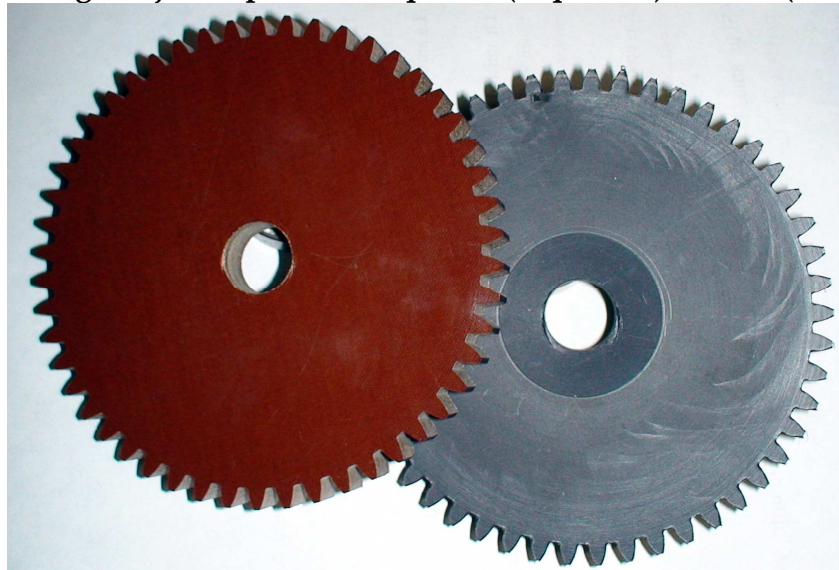
Fuente: Mott, Robert L, Diseño de Elementos de Máquinas, 4 Ed.

Los ángulos de presión han sido normalizados por los fabricantes a unos cuantos valores, entre los que se tiene 14.5° , 20° y 25° ; en lo que a nuestro caso se refiere, se ha escogido como ángulo de presión el correspondiente a 20° ,

debido a que es muy comercial en la industria automotriz y en el de motocicletas.

Los engranajes de prueba (Figura 47) fueron construidos con el mismo módulo para garantizar su correcto acoplamiento, además, para garantizar homogeneidad en las pruebas, se construyeron con igual número de dientes y en el mismo montaje. El módulo y el ángulo de presión se escogieron debido a su popularidad en el mercado de motocicletas, lo cual es indispensable para darle más practicidad y realismo a la prueba.

Figura 47. Engranajes de prueba: Baquelita (Izquierda), Prolón (Derecha)



Fuente: Propia

Para determinar el número de dientes: $D_e = m(z+2)$ [Ec. 14]

Entonces, teniendo en cuenta que los parámetros geométricos de los engranajes son:

$$D_e = 100 \text{ mm}$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$m = 2$$

Obtendremos que $z = 48$, donde: α = ángulo de presión,

m = módulo

z = número de dientes

En el caso del engranaje patrón (Figura 48), fue seleccionado acorde a su proceso de fabricación, ya que entre más preciso haya sido éste, menor influenciará en los resultados de las pruebas; para tal fin, se compró un engranaje de una caja de cambios de motocicleta a la casa distribuidora YAMAHA, para que sea a su vez compatible con todas las experiencias a realizar.

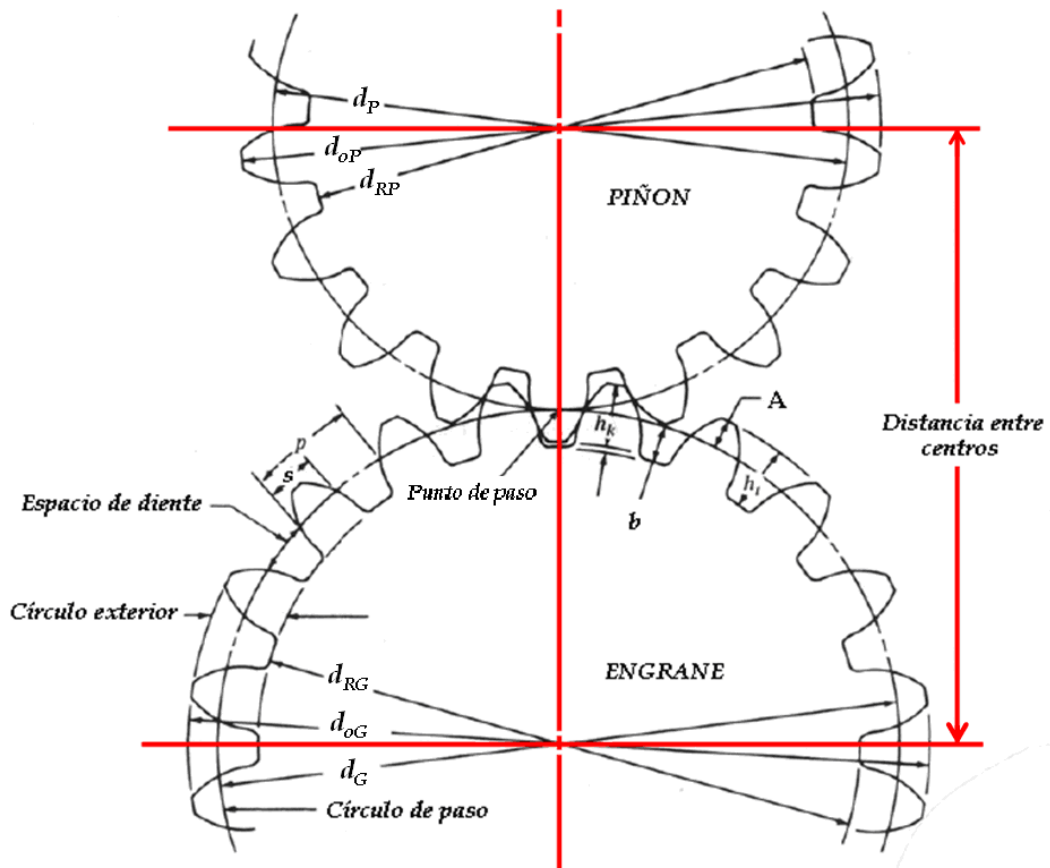
Figura 48. Engranaje patrón



Fuente: Propia

Dicho engranaje patrón fue construido por medio del proceso de generación por fresa madre, el cual nos garantiza menores imprecisiones que los métodos de fabricación convencional.

Figura 49. Propiedades de pares de engranajes (geometría de su acoplamiento)



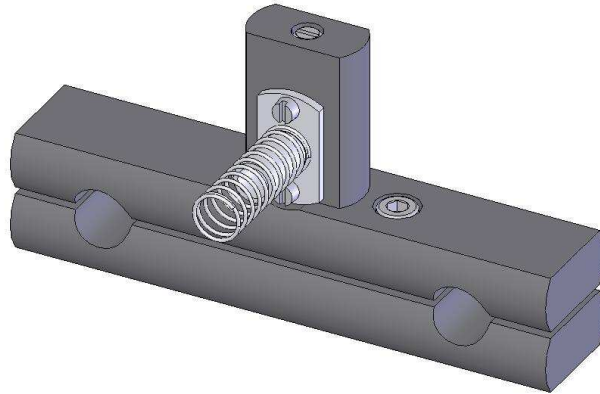
Adaptada de: Mott, Robert L, Diseño de Elementos de Máquinas, 4 Ed. (Nota: Los subíndices G y P son para indicar al engrane y al piñón respectivamente).

3.6. PORTACARÁTULA

El portacarátula (Figura 50) es el dispositivo que se utiliza para sujetar firmemente y en la posición adecuada al reloj comparador digital. Consta de dos placas sujetas con la ayuda de un prisionero a los ejes del sistema de guía,

garantizando así la alineación y perpendicularidad con una tercera pieza, la cual es la que sostiene el reloj como tal, en el momento de la toma de datos, dicha pieza sirve además como soporte del resorte de compresión. Posee también una pieza en Aluminio que sirve para protección del reloj comparador en caso que durante la prueba o el montaje se presente una deformación excesiva en el resorte.

Figura 50. Portacarátula



Fuente: Propia

4. DISEÑO DE EXPERIENCIAS Y ELABORACION DEL MANUAL

La instrucción de las actividades y experiencias del laboratorio es impartida por el docente durante el desarrollo de las clases, siendo también el encargado de supervisar la realización de todas las practicas programadas durante la jornada.

Se inducirá al estudiante para la realización de las experiencias durante el transcurso de la clase por medio de una descripción del objetivo referente a la práctica a realizar, mostrando además, los elementos a comprobar, para que cuando ésta finalice, se cuestione acerca de las situaciones observadas y conclusiones obtenidas.

Para el diseño de las experiencias se tuvo en cuenta el análisis de los elementos del banco, las observaciones mencionadas anteriormente, el respaldo de la norma AGMA 915-2-A05 y los fundamentos teóricos que preceden al área del diseño de máquinas y los contenidos que se desarrollan en la misma.

4.1. DISEÑO DE LAS EXPERIENCIAS

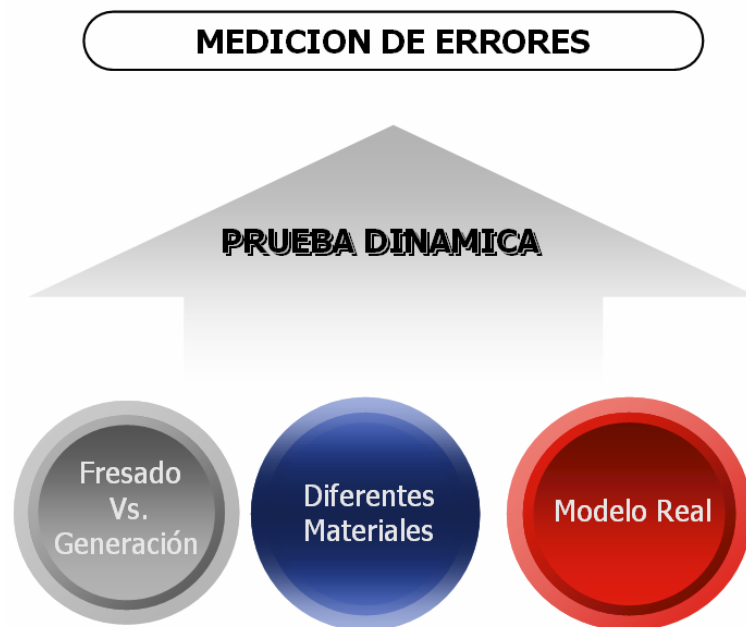
El diseño de las experiencias ha sido enfocado a lograr un óptimo desarrollo de los objetivos planteados en las mismas por parte de los estudiantes del área de diseño de máquinas, con el apoyo de una descripción pertinente y detallada para cada parte de la prueba.

4.1.1. Contenido de las experiencias

Las tres experiencias a realizar (Figura 51), buscan determinar las desviaciones de la prueba radial compuesta (acorde a lo estipulado en el capítulo 2) para tres configuraciones diferentes de montaje:

- Fresado Vs. Generación: en esta prueba se compara el fresado convencional con fresado por generación.
- Diferentes materiales: que evalúa engranajes de distintos materiales pero de iguales parámetros geométricos.
- Modelo real: en la cual se evalúa un sistema mecánico real (caja de velocidades).

Figura 51. Experiencias realizadas en el banco.



Fuente: Propia

4.1.1.1. Experiencia de Fresado Vs. Generación

Busca realizar la comparación entre dos de los principales métodos de manufactura de engranajes, como son el fresado convencional y la generación por fresa madre (ver Figura 52); para esto, se realiza el montaje de la prueba compuesta con un ejemplar de cada uno de estos procesos de fabricación, evaluando sus errores, para posteriormente realizar una comparación de los resultados en estas mediciones.

Figura 52. Fresado convencional versus fresa madre.



Fuente: Museo de Alemania

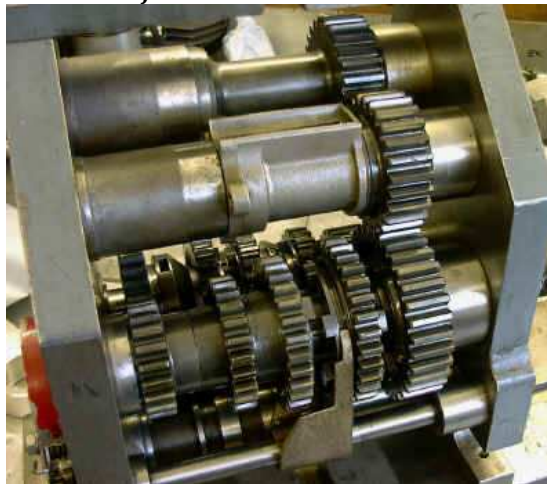
4.1.1.2. Experiencia con Diferentes Materiales

El principio de esta prueba es el de estudiar el comportamiento de los errores en los engranajes de diversos materiales pero que tengan iguales parámetros geométricos. Para tal fin, fueron utilizados engranajes elaborados en Nylon 6 (Prolón) y Fibra Fenólica (Baquelita) (Ver figura 47).

4.1.1.3. Experiencia de Modelamiento Real

Consiste en la determinación de los errores anteriormente mencionados presentes en un sistema mecánico real, para lo cual, se hizo uso de una caja de velocidades de una motocicleta YAMAHA DT 175 en un montaje adecuado para su manipulación durante la realización de las experiencias, se recomienda el ilustrado en la figura 53.

Figura 53. Montaje de la Caja de Velocidades.



Disponible en: www.broom.engineering.btinternet.co.uk/technical.htm

La prueba se debe realizar después del desmontaje de los engranajes respectivos de la caja de velocidades citada anteriormente, para luego realizar el montaje en el dispositivo verificador y entonces, culminar con la medición del error respectivo a la experiencia correspondiente.

4.1.2. Diseño del manual

Para realizar una documentación adecuada del laboratorio, se diseñó un manual de procedimientos dirigido al estudiante donde se describe el banco,

junto con sus parámetros de funcionamiento y la ubicación de las experiencias (ver Anexo 1). En la tabla 5 se describe la estructura relacionada a cada una de las experiencias.

Tabla 5. Estructura de las experiencias del laboratorio

COMPONENTE	DESCRIPCION
Numeración de la prueba	Enumerar las prácticas por cada grupo de pruebas.
Título	Nombre respectivo para cada práctica.
Objetivos	Objetivo General Objetivos Específicos
Fundamentación previa al laboratorio	Este punto va a ser común para todas las prácticas. En este ítem se realiza la visión general de la prueba, que consiste en un estudio bibliográfico y la caracterización de los dispositivos presentes en la experiencia.
Lista de componentes	Se muestran todos los componentes necesarios para realizar cada experiencia.
Esquema de montaje	Se presenta una descripción gráfica del montaje.
Procedimiento	Se realiza el montaje y se desarrolla el orden de la práctica de acuerdo con las necesidades respectivas. Se debe tener un seguimiento continuo en la retroalimentación de objetivos por parte de los auxiliares.
Análisis de Resultados	Se realizan tablas o gráficas de acuerdo con los requerimientos en cada prueba.
Conclusiones	Se realizan las conclusiones acerca de la experiencia.

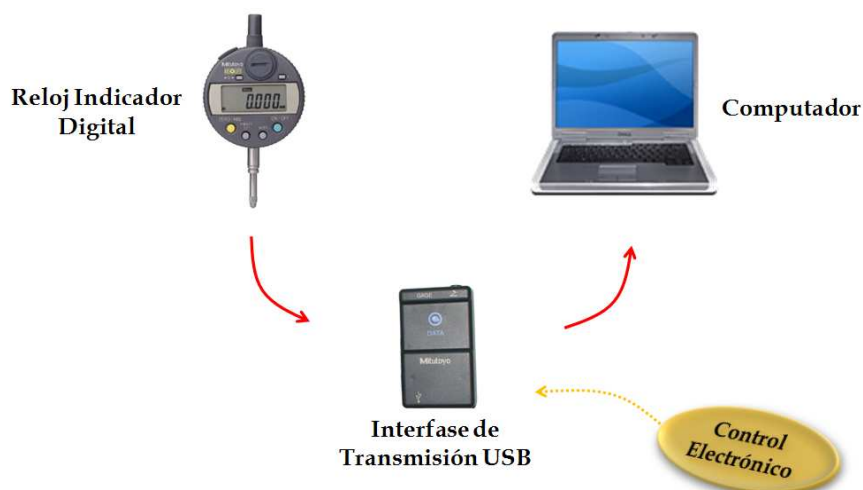
5. PRUEBAS DINAMICAS Y DESCRIPCION DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

5.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se hace mediante un sistema que se compone de un reloj indicador digital y una interfase de transmisión USB elaborados por la casa Mitutoyo*, en donde, el reloj medirá los desplazamientos pertinentes a la distancia entre centros de los engranajes y la interfase se encarga de transferir dichos datos al PC.

El sistema funciona transmitiendo la señal al PC vía USB, directamente a Microsoft EXCEL*, luego de enviar los pulsos mediante la interfase de transmisión (Figura 55).

Figura 54. Descripción del Sistema de Adquisición de Datos



Fuente: Propia

Serán transmitidos 50 pulsos al computador gracias a la ayuda de una tarjeta integrada diseñada para tal fin; el objetivo es el de tener la mayor cantidad de mediciones posibles para realizar la gráfica de la forma más exacta; entonces, bajo dicha configuración, se tendría un pulso enviado al PC cada 7,2° de circunferencia.

5.2. PUESTA A PUNTO DEL DISPOSITIVO

La puesta a punto consiste en comprobar diferentes opciones de montaje para verificar un adecuado funcionamiento; en nuestro caso, se acompañará cada uno de los montajes con la curva en EXCEL* respectiva.

Uno de los principales inconvenientes de la puesta a punto, fue el hecho que la interfaz del reloj comparador digital tiene restringidos la cantidad de pulsos que es capaz de transmitir, además, existen dificultades de transmisión para los valores con signo negativo, pues el PC los reconoce como texto, lo que nos conlleva a tener que convertir dichos valores de forma manual para poder realizar las gráficas.

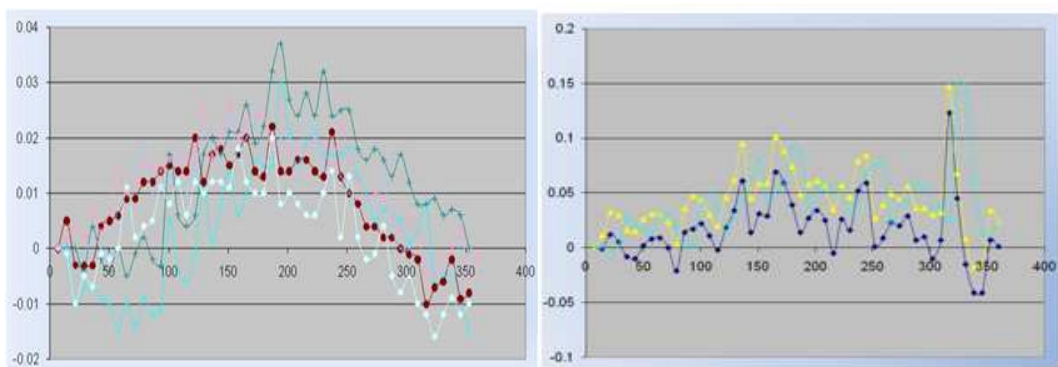
5.2.1. Pruebas Dinámicas

Para la verificación del estado de los engranajes descritos en el capítulo tres, es necesario analizar las gráficas de las pruebas pertinentes para cada uno. La prueba tiene una duración de 10s, durante los cuales se realizan 50 mediciones, las cuales, serán correlacionadas con los grados de la circunferencia para la realización de las gráficas. Las experiencias citadas a continuación fueron descritas en el capítulo 4, por lo cual, ahora sólo se limitará a mostrar los resultados obtenidos en las pruebas.

5.2.1.1. Fresado Convencional Vs. Fresado por Generación

Para esta prueba se compararán los resultados obtenidos con el montaje de engranajes con distintos procesos de fabricación; debido a su alto costo de manufactura, las pruebas serán realizadas con engranajes de diferente material y número de dientes. En esta prueba lo importante es evaluar el proceso, más no el engranaje como tal.

Figura 55. Resultados Fresado por Generación (Izq) Vs. Fresado Convencional (Der)



Fuente: Propia

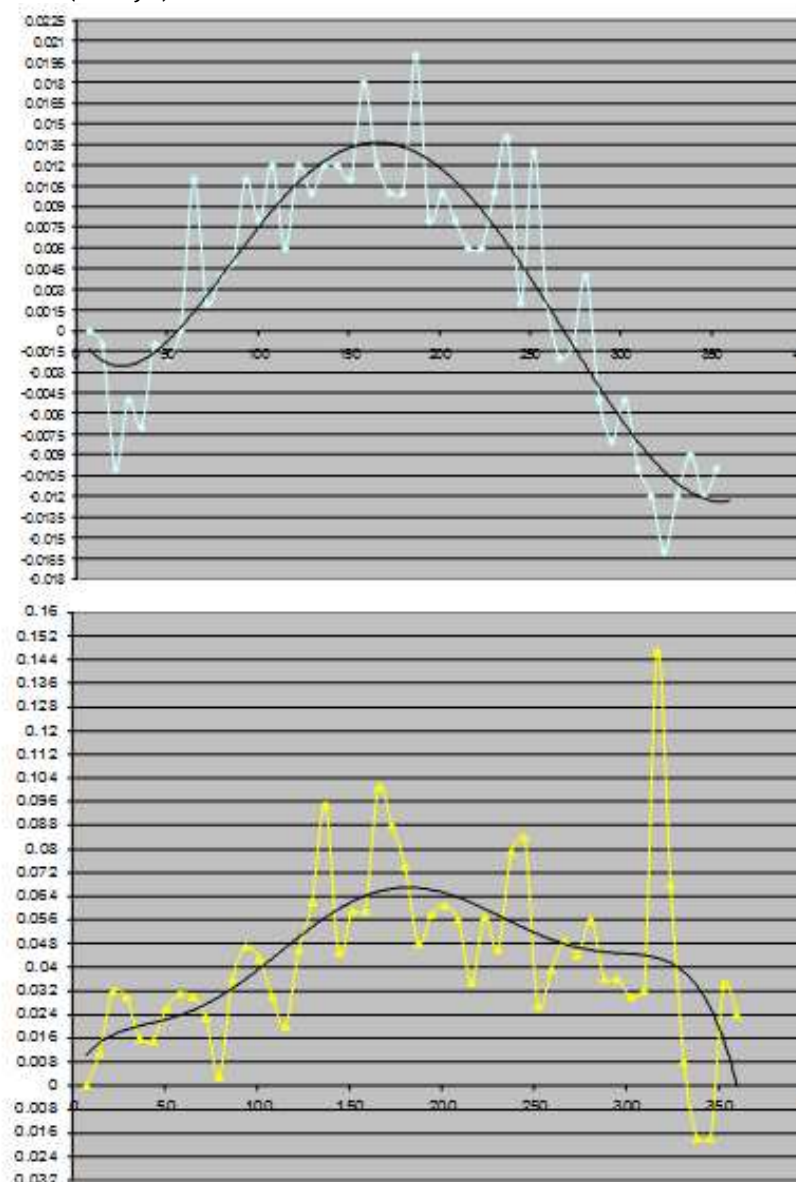
Debido a que su geometría es diferente, lo importante es evaluar la suavidad de la curva del engranaje fabricado por generación, pues no presenta picos pronunciados y además, tener en cuenta que los rangos son muy diferentes, ya que en el de fresado por generación el pico más alto se obtuvo a $40 \mu\text{m}$ mientras que en el fresado convencional se obtuvo un pico máximo de $150 \mu\text{m}$, lo que nos da una relación de 3,75 veces menor exactitud.

A continuación se toma la curva promedio en cada caso y se determina el grado de calidad AGMA basados en los valores descritos en la tabla 3.

Tabla 6. Resultados Prueba Procesos Manufactura

<i>Item</i>	$f_{id}[\mu m]$	$F_{id}[\mu m]$	$F_r[\mu m]$	<i>Grado AGMA</i>
Generación	15	36	13,6	C7
Convencional	165	165	67,5	C12

Figura 56. Curvas Representativas Para los Casos de Generacion (Arriba) y Convencional (Abajo)

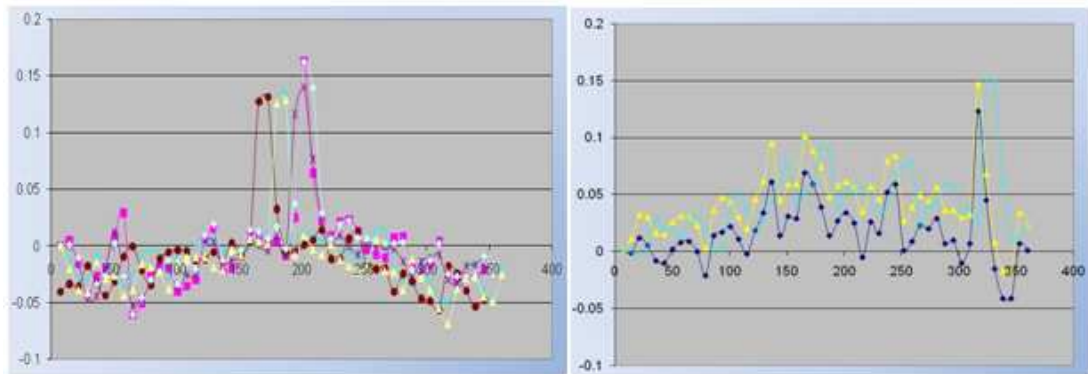


Fuente: Propia

5.2.1.2. Diferentes Materiales

Como se menciona en el capítulo cuatro, en esta prueba se compara el comportamiento de engranajes de distintos materiales para visualizar si estos afectan el comportamiento del mismo, la gráfica que se ilustra a continuación (Figura 57) pertenece a dos engranajes de iguales parámetros geométricos pero de diferente material.

Figura 57. Bakelita (Izq) Vs. Prolon (Der)



Fuente: Propia

Como se puede observar, vemos que el engranaje de bakelita (izquierda) oscila en el rango de [0,162um a -0,061um] mientras que en el de prolón (derecha) el rango de valores está entre [0,15 um a -0,041um], lo que en realidad ilustra, que en promedio se tienen entre 10 y 20 um de desfase entre ambos engranajes. Lo importante es que el valor de los picos representativos, son prácticamente los mismos, indicando que el error es igual.

La variación en el posicionamiento del pico es debida al montaje del engranaje, pues como se desconoce la posición angular del diente que está mal, es muy difícil posicionar los engranajes exactamente en la misma

posición en el momento de inicio de la prueba, ya que a simple vista, ambos engranajes aparentar ser exactamente iguales.

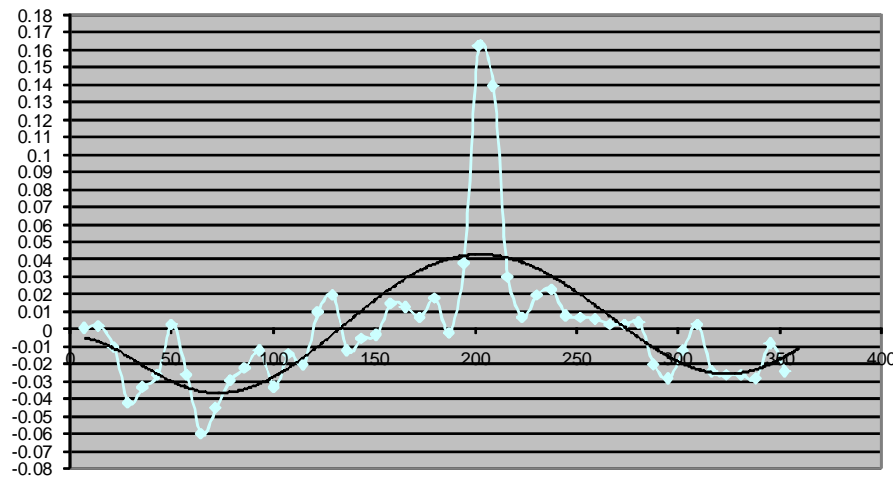
Tabla 7. Resultados Bakelita Vs. Prolon

<i>Item</i>	$f_{id}[\mu m]$	$F_{id}[\mu m]$	$F_r[\mu m]$	<i>Grado AGMA</i>
Bakelita	165	223	80	C12
Prolon	165	165	67,5	C12

Fuente: Propia

LA comparación de las curvas representativas son ilustradas en las Figuras 56 (*abajo*) y 58; se puede apreciar que el error diente a diente es del mismo valor en ambos gráficos, el desfase en la posición es debido a que es muy difícil determinar visualmente que el punto de partida para la medición sea el mismo.

Figura 58. Curva crítica representativa Bakelita



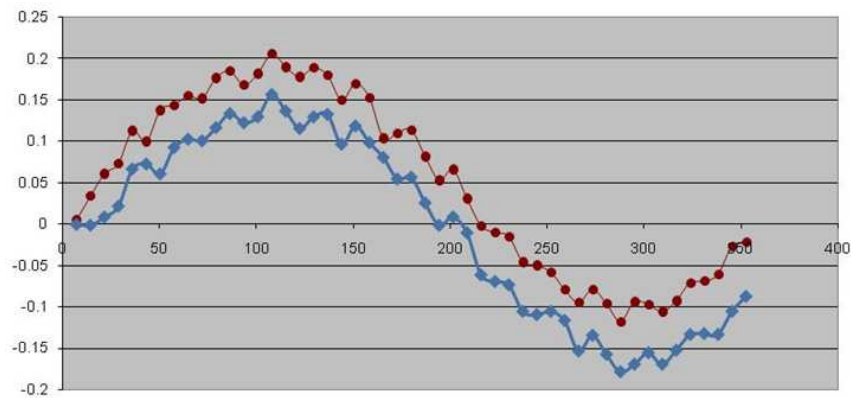
Fuente: Propia

5.2.1.3. Modelo Real

En esta prueba, se evalúan dos engranajes pertenecientes al mismo sistema mecánico: una caja de velocidades de una motocicleta. La idea no es comparar valores el uno con el otro, pues estos engranajes son

geométricamente diferentes (exceptuando al modulo) sino la de evidenciar como el trabajo sobre los mismos incrementa la posibilidad de falla, evidenciada en los picos en la grafica.

Figura 59. Engranaje de caja de velocidades



Si se comparan los resultados obtenidos con los de un engranaje similar (Figura 60), se observa que el duro trabajo hace incrementar el rango de error hasta llegar a 0,2 mm, lo que significa un desfase 5 veces más grande.

Tabla 8. Resultados Prueba en Sistema Mecánico Real

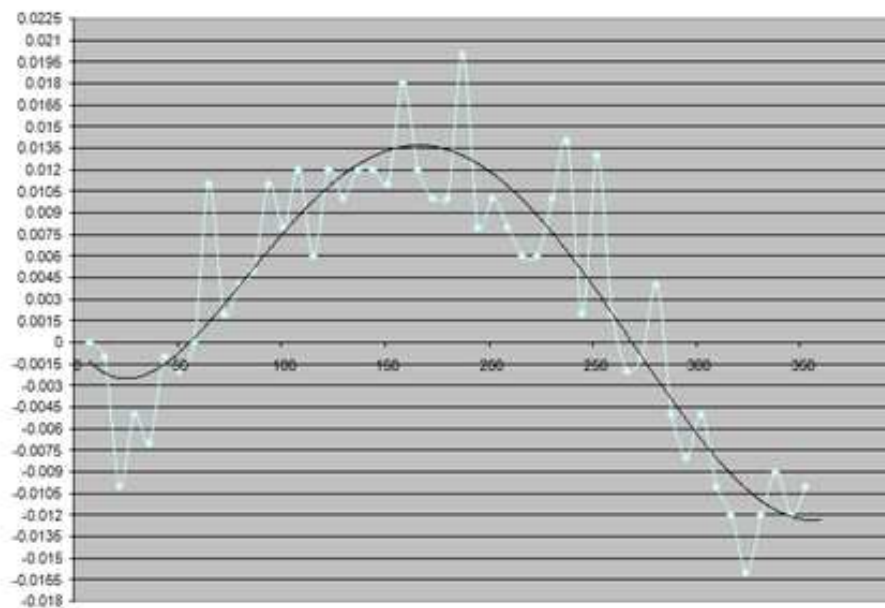
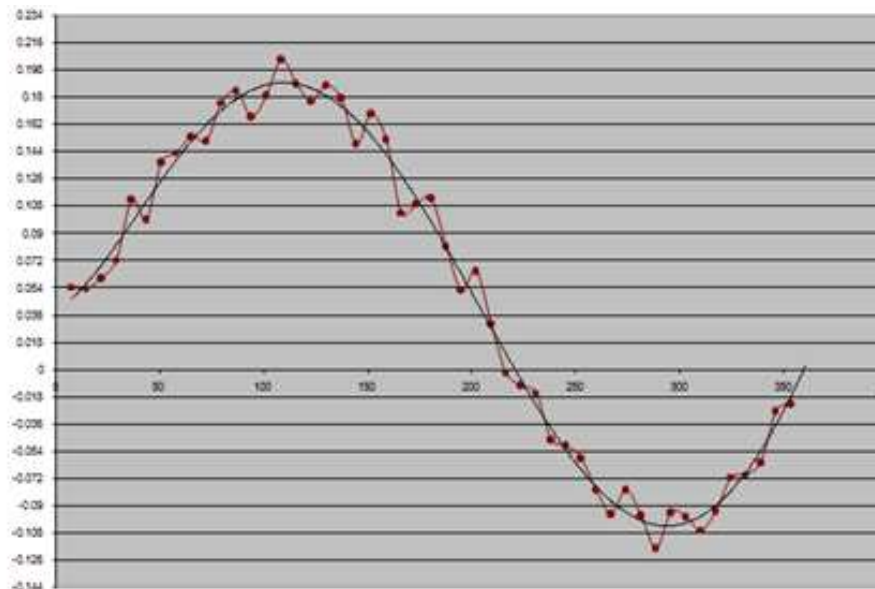
<i>Item</i>	$f_{id}[\mu m]$	$F_{id}[\mu m]$	$F_d[\mu m]$	<i>Grado AGMA</i>
Velocidad 1	15	36	13,6	C7
Velocidad 2	274	324	293	C12**

Fuente: Propia

* *Fuera del rango de medida.

Al presentar los rangos de calidad fuera del margen, es posible concluir entonces que este engranaje ya no es apto para el servicio debido a las deformaciones que ha sufrido durante su trabajo.

Figura 60. Curva Representativas para Dos Velocidades de una Caja de Cambios (Arriba Velocidad 1, Abajo Velocidad 2)



CONCLUSIONES

El Banco Experimental para la medición de la desviación radial compuesta total, presenta las siguientes ventajas:

1. Permite evaluar de forma precisa y rápida el estado de un engranaje recto justo después de su manufactura.
2. Presenta gran facilidad de manejo, permitiendo que el usuario confronte diferentes procesos de manufactura de engranajes rectos.
3. Es una herramienta didáctica que permite que el estudiante analice comportamientos referentes a las diferentes clases de situaciones que pueden presentarse durante la manufactura de un engranaje.

La variación del material de construcción de un engranaje no influye en su comportamiento funcional, mientras tenga los mismos parámetros geométricos y se haya construido con el mismo procedimiento de manufactura.

La exactitud del engranaje está directamente relacionada con su proceso de fabricación/manufactura, afectando en gran medida su calidad.

Esta prueba está diseñada para la evaluación de engranajes rectos recién manufacturados, aunque sirve para evaluar los usados, no muestra errores tales como aplastamiento, desgaste o roturas, etc., propios del uso de los mismos.

La norma plantea un criterio de aceptación de un engranaje [Secc. 2.2.1], pero este, demanda de la calibración del engranaje patrón; para realizar lo anterior sería necesario tener 5 engranajes patrones (o dos como mínimo) [Secc 2.5] y por razones de índole económica, tal criterio no fue evaluado en el presente proyecto.

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Se debe enfatizar que este proyecto no fue concebido con miras de certificación metrológica, sino que fue realizado con fines académicos, como refuerzo para entender el comportamiento de engranajes en el área de diseño de máquinas.

Desafortunadamente, debido a los altos costos que esto implica, no pudo hacerse uso de un engranaje patrón calibrado y certificado para la realización de las pruebas, lo que trae consigo cierto margen de error, se sugiere que si en un futuro se decide desarrollar un banco de nivel de certificación metrológica, se debe adquirir al menos uno de estos engranajes.

A pesar de ser un método para evaluar engranajes muy rápido, presenta el inconveniente de las lecturas en los signos a causa de la mala calidad de la interfaz MITUTOYO, se sugiere depurarla un poco mejor e intentar corregir este error para así contar con gráficos de forma más rápida.

Debido a los altos costos en la consecución de soporte teórico, no existen registros escritos de ninguna índole como respaldo bibliográfico para soporte académico de los estudiantes, por lo que tendrían que conformarse con lo escrito en el presente libro y sin poder contar con ninguna norma técnica que respalde la experiencia; por tanto se sugiere la compra de las normas AGMA pertinentes para tal fin.

Este proyecto se puede tomar como punto de inicio en la investigación y/o desarrollo de nuevos dispositivos de control de calidad para las diferentes

clases de engranajes (rectos, cónicos, helicoidal y sinfín), ya que debido a su diseño, es posible la adaptación de nuevos módulos que permitan la inspección en los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] **Gear Products Magazine.** Octubre 2006
- [2] **GERLING, H.** Alrededor de las Máquinas Herramienta. Editorial Reverte S.A. Tercera Edición. Barcelona. 1984.
- [3] **DUDLEY, Darle W.** Gear Handbook. Primera Edición. Editorial Mc Graw Hill. 1962.
- [4] **NORMA TECNICA ANSI-AGMA 2015-2-A06.** American Gear Manufacturer Association. Accuracy Classification System - Radial Measurements for Cylindrical Gears.
- [5] **NORMA TECNICA ANSI-AGMA 915-2-A05.** American Gear Manufacturer Association. Inspection Practices Part 2: Cylindrical Gears - Radial Measurements.
- [6] **DEUTSCHMAN, Aaron, MICHELS, Walter & WILSON Charles.** Diseño de Máquinas: Teoría y Práctica. Compañía Editorial Continental S.A. Segunda Reimpresión. México. 1987.
- [7] **FAIRES, Virgil M.** Diseño de Elementos de Máquinas. Ed. LIMUSA. Primera Edición. Octava Reimpresión. 1998.

[8] **MOTT, Robert L.** Diseño de Elementos de Máquinas. Ed. Pearson. Cuarta Edición. 2006.

[9] **CAMPABADAL, José.** Engranajes. Ed. Ariel S.A. 1969.

[10] **SKF.** Electronic Handbook Versión 2.31. 1996

[11] **SDP.** Elements of Metric Gear Technology.

[12] **ROJAS, Hernán.** Diseño de Máquinas 2. Publicaciones UIS. Bucaramanga.

[13] **ROJAS, Hernán.** Rodamientos. Publicaciones UIS. Bucaramanga. 1984.

[14] **NORTON, Robert.** Diseño de Maquinas. Ed. Prentice Hall. 1 Edición. 1999.

ANEXOS

PRACTICA 1

FRESADO VS. GENERACIÓN

**LABORATORIO DE DISEÑO DE MÁQUINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**



1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar habilidades de diagnóstico y control de calidad en sistemas de engranajes producidos mediante diferentes procesos de fabricación, a través de la medición de las desviaciones compuestas presentes en estos sistemas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Reconocer la medición como una herramienta que nos provee información de diagnóstico de un proceso automático y de los dispositivos que funcionan en el mismo.
- ✓ Evaluar los diferentes errores de la desviación radial compuesta: F_{id} , f_{id} y F_r en los engranajes.

- ✓ Identificar las diferencias existentes entre los engranajes fabricados mediante generación y fresado convencional mediante la aplicación del método de desviación compuesta.
- ✓ Determinar el grado de calidad de los engranajes evaluados acorde a las desviaciones obtenidas durante la experiencia.

FUNDAMENTACIÓN

La mayor parte de los engranajes son fabricados conforme a estándares dados por asociaciones nacionales tales como American Gear Manufacturers Association (AGMA), American Standards Association (ASA) y American Society of Mechanical Engineers (ASME).

En el fresado convencional se usa una fresa con la forma del espacio del diente, y se corta por completo cada espacio antes de girar el modelo a la posición del espacio siguiente. Este método se emplea principalmente con engranes grandes, y se requieren gran cuidado para obtener resultados exactos.

Este método de fabricación tiene una desventaja que es lo suficiente importante como para limitar fuertemente los usos de los engranes cortados por este método. Con certeza el cortador solo puede ser usado para cortar un engrane de cierto paso y cierto número de dientes. En otras palabras, deberá usarse cortador diferente no solo para cada paso sino también para cada número de dientes. Si en la fabricación de engranes se tomara esto en cuenta, el costo del engrane sería prohibitivo. El procedimiento usual es emplear el mismo cortador para ocho o diez números diferentes de dientes de un paso dado.

El fresado por generación es un proceso parecido al anterior, pero la pieza (el modelo del engrane) y la fresa madre giran en una forma coordinada. También, en este caso, la forma del diente se genera en forma gradual a medida que la fresa madre avanza en el modelo.

La principal desventaja de este método es que la forma del diente de la fresa madre es directamente transferida a la pieza a cortar y cualquier error en el perfil de alguno de los dientes de la fresa, se pasará al diente cortado en la pieza. Sin embargo, teniéndose cuidado en los procesos de fabricación, este método es probablemente el mejor de los procesos descritos.

COMPONENTES

1. Engranaje Patrón



2. Engranajes de Prueba: Fresado (Arriba) y Generación (Abajo)



3. Reloj Comparador Digital



4. Interfaz USB



PROCEDIMIENTO

1. *Montaje del engranaje patrón sobre el carro deslizante.*



2. *Montaje del engranaje fabricado por fresado convencional en el husillo.*



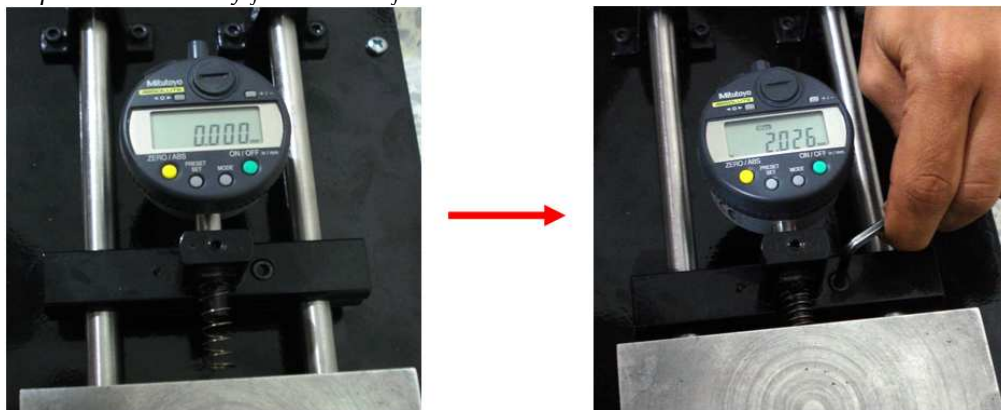
3. *Acercar el carro deslizante para acoplar los engranajes.*



4. *Asegurar el reloj comparador digital en el portacarátula.*



5. *Setear el reloj comparador digital en cero y acercar el portacarátula hasta asegurar el contacto en los dos flancos del diente mediante el uso del resorte de compresión, hasta una profundidad de 2mm aproximadamente, para posteriormente fijarlo a los ejes.*



6. Realizar las conexiones eléctricas y la interfaz con el PC.
7. Espere a que el motor se sincronice.
8. Setear el reloj comparador para que la lectura indicada sea cero.



9. Oprima el botón de inicio.
10. Leer los resultados obtenidos de la prueba en una hoja de MICROSOFT EXCEL*, para la realización de la gráfica correspondiente.
11. Desmontar el engranaje fabricado por fresado convencional, reemplazarlo por el fabricado por generación y repetir el procedimiento desde el paso 3 hasta el 10.
12. Desmontar los engranajes y desconectar el cableado.

ANALISIS DE RESULTADOS

1. Graficar las curvas y determinar los errores Fid , fid y Fr de cada engranaje.
2. Determinar el grado de calidad AGMA, de acuerdo a la tabla 3 del presente libro.
3. Comparar los resultados y sacar las respectivas conclusiones.

PRACTICA 2

COMPARACION DE DIFERENTES MATERIALES

LABORATORIO DE DISEÑO DE MÁQUINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar habilidades de diagnóstico y control de calidad en engranajes fabricados en diferentes materiales que conservan los mismos parámetros geométricos, a través de la medición de las desviaciones compuestas presentes en los mismos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Reconocer la medición como una herramienta que nos provee información de diagnóstico de un proceso automático y de los dispositivos que funcionan en el mismo.
- ✓ Evaluar los diferentes errores de la desviación radial compuesta: F_{id} , f_{id} y F_r en los engranajes.
- ✓ Identificar las diferencias existentes entre los engranajes fabricados en Nylon 6 (prolón), fibra fenólica (bakelita), mediante la aplicación del método de desviación compuesta.

- ✓ Determinar el grado de calidad de los engranajes evaluados acorde a las desviaciones obtenidas durante la experiencia.

FUNDAMENTACIÓN

Las resinas fenólicas son las mas antiguas y aún hoy las mas usadas entre las resinas termofraguantes. Fueron desarrolladas por L. H. Baekeland en el 1909, por tal razón, son conocidas como *Baquelita* ó *Bakelita* y tuvieron un gran éxito sobre todo en el periodo entre las dos guerras mundiales. Las masas de estampado fenólico se usan para fabricar elementos de la industria eléctrica, en radio, en televisión, en teléfonos y en la industria de autopartes; además se fabrican piezas para el sector de los electrodomésticos, en el sector aerospacial y en la defensa.

El *Nylon 6* o Poliamida 6 es el más conocido y utilizado de los plásticos técnicos. Posee excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas, y la posibilidad de ser modificado con aditivos (MoS₂).

Características principales:

- Alta resistencia mecánica, rigidez, dureza y tenacidad
- Buena resistencia a la fatiga
- Alto poder amortiguador
- Buenas propiedades de deslizamiento
- Resistencia sobresaliente al desgaste

Muchas veces, el Nylon 6 responde exitosamente donde metales y otros materiales fallan. Sus nombres comerciales más comunes: PROLON, GRILON, NYLON, ERTALON, SUSTAMID, etc.

COMPONENTES

1. Engranaje Patrón



2. Engranajes de Prueba: Baquelita (Izq) y Prolón (Der)



3. Reloj Comparador Digital



4. Interfaz USB



PROCEDIMIENTO

1. *Montaje del engranaje patrón sobre el carro deslizante.*



2. Montaje del engranaje fabricado en Prolón en el husillo.



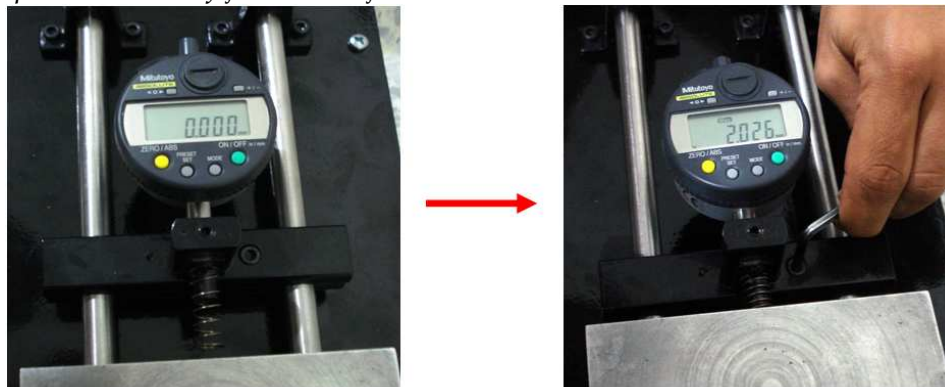
3. Acercar el carro deslizante para acoplar los engranajes.



4. Asegurar el reloj comparador digital en el portacarátula.



5. *Setear el reloj comparador digital en cero y acercar el portacarátula hasta asegurar el contacto en los dos flancos del diente mediante el uso del resorte de compresión, hasta una profundidad de 2mm aproximadamente, para posteriormente fijarlo a los ejes.*



6. *Realizar las conexiones eléctricas y la interfaz con el PC.*
7. *Espere a que el motor se sincronice.*
8. *Setear el reloj comparador para que la lectura indicada sea cero.*



9. *Oprima el botón de inicio.*
10. *Leer los resultados obtenidos de la prueba en una hoja de MICROSOFT EXCEL*, para la realización de la gráfica correspondiente.*
11. *Desmontar el engranaje fabricado en prolón, reemplazarlo por el fabricado en baquelita y repetir el procedimiento desde el paso 3 hasta el 10.*
12. *Desmontar los engranajes y desconectar el cableado.*

ANALISIS DE RESULTADOS

1. *Graficar las curvas y determinar los errores F_{id} , f_{id} y F_r de cada engranaje.*
2. *Determinar el grado de calidad AGMA, de acuerdo a la tabla 3 del presente libro.*
3. *Comparar los resultados y sacar las respectivas conclusiones.*

PRACTICA 3

VERIFICACION EN SISTEMA MECANICO REAL

LABORATORIO DE DISEÑO DE MÁQUINAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



3. OBJETIVO GENERAL

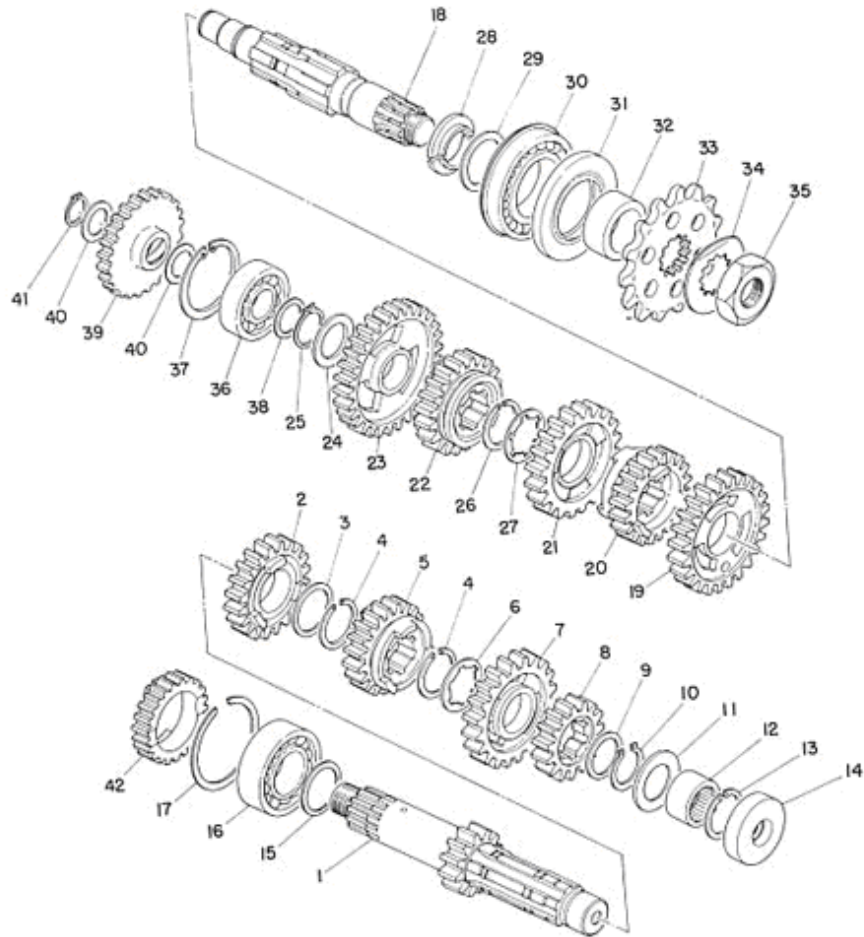
Desarrollar habilidades de diagnóstico y control de calidad en un sistema mecánico real de transmisión, a través de la medición de las desviaciones compuestas presentes en los mismos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Reconocer la medición como una herramienta que nos provee información de diagnóstico de un proceso automático y de los dispositivos que funcionan en el mismo.
- ✓ Evaluar los diferentes errores de la desviación radial compuesta: F_{id} , f_{id} y F_r en los engranajes.
- ✓ Identificar cual velocidad es la que presenta un mayor deterioro en su geometría debido a su funcionamiento, mediante la aplicación del método de desviación compuesta.
- ✓ Determinar el grado de calidad de los engranajes evaluados acorde a las desviaciones obtenidas durante la experiencia.

FUNDAMENTACIÓN

A continuación se muestra la explosión de la caja dispuesta en el catálogo del fabricante:



TRANSMISSION

- | | | | |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 1. Main axle | 12. Bearing | 22. 4th gear wheel | 32. Distance collar |
| 2. 4th gear pinion | 13. Circlip | 23. 1st gear wheel | 33. Drive socket |
| 3. Washer | 14. Oil seal | 24. Washer | 34. Lockwasher |
| 4. Circlip | 15. Main axle shim | 25. Circlip | 35. Locknut |
| 5. 3rd gear pinion | 16. Bearing | 26. Circlip | 36. Bearing |
| 6. Washer | 17. Circlip | 27. Washer | 37. Circlip |
| 7. 5th gear pinion | 18. Drive axle | 28. Drive axle spacer | 38. Drive axle shim |
| 8. 2nd gear pinion | 19. 2nd gear wheel | 29. Drive axle shim | 39. Kick idle gear (outside case) |
| 9. Washer | 20. 5th gear wheel | 30. Bearing | 40. Shim |
| 10. Circlip | 21. 3rd gear wheel | 31. Oil seal | 41. Circlip (outside case) |
| 11. Shim | | | 42. Kick pinion gear (outside case) |

COMPONENTES

1. Engranaje Patrón



2. Engranajes de Prueba: Velocidades de la Caja de Cambios



3. Reloj Comparador Digital



4. Interfaz USB



PROCEDIMIENTO

1. *Montaje del engranaje patrón sobre el carro deslizante.*



2. *Montaje del engranaje correspondiente a la velocidad que se va a evaluar (se ilustra la primera velocidad) en el husillo.*



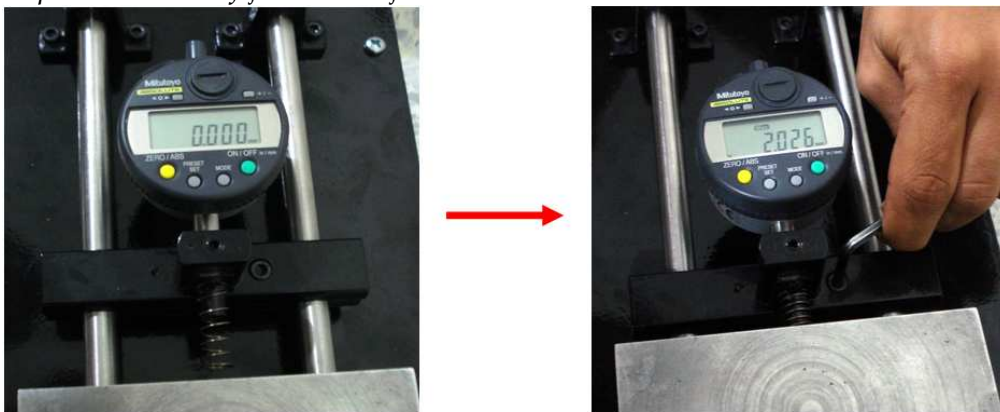
3. *Acercar el carro deslizante para acoplar los engranajes.*



4. Asegurar el reloj comparador digital en el portacarátula.



5. Setear el reloj comparador digital en cero y acercar el portacarátula hasta asegurar el contacto en los dos flancos del diente mediante el uso del resorte de compresión, hasta una profundidad de 2mm aproximadamente, para posteriormente fijarlo a los ejes.



6. Realizar las conexiones eléctricas y la interfaz con el PC.

7. Espere a que el motor se sincronice.

8. Setear el reloj comparador para que la lectura indicada sea cero.



9. *Oprima el botón de inicio.*
10. *Leer los resultados obtenidos de la prueba en una hoja de MICROSOFT EXCEL*, para la realización de la gráfica correspondiente.*
11. *Desmontar el engranaje correspondiente, reemplazarlo por el de la velocidad que se desee evaluar y repetir el procedimiento desde el paso 3 hasta el 10, las veces que sean necesarias*
12. *Desmontar los engranajes y desconectar el cableado.*

ANALISIS DE RESULTADOS

1. Graficar las curvas y determinar los errores F_d , f_d y F_r de cada engranaje.
2. Determinar el grado de calidad AGMA, de acuerdo a la tabla 3 del presente libro.
3. Comparar los resultados y sacar las respectivas conclusiones.

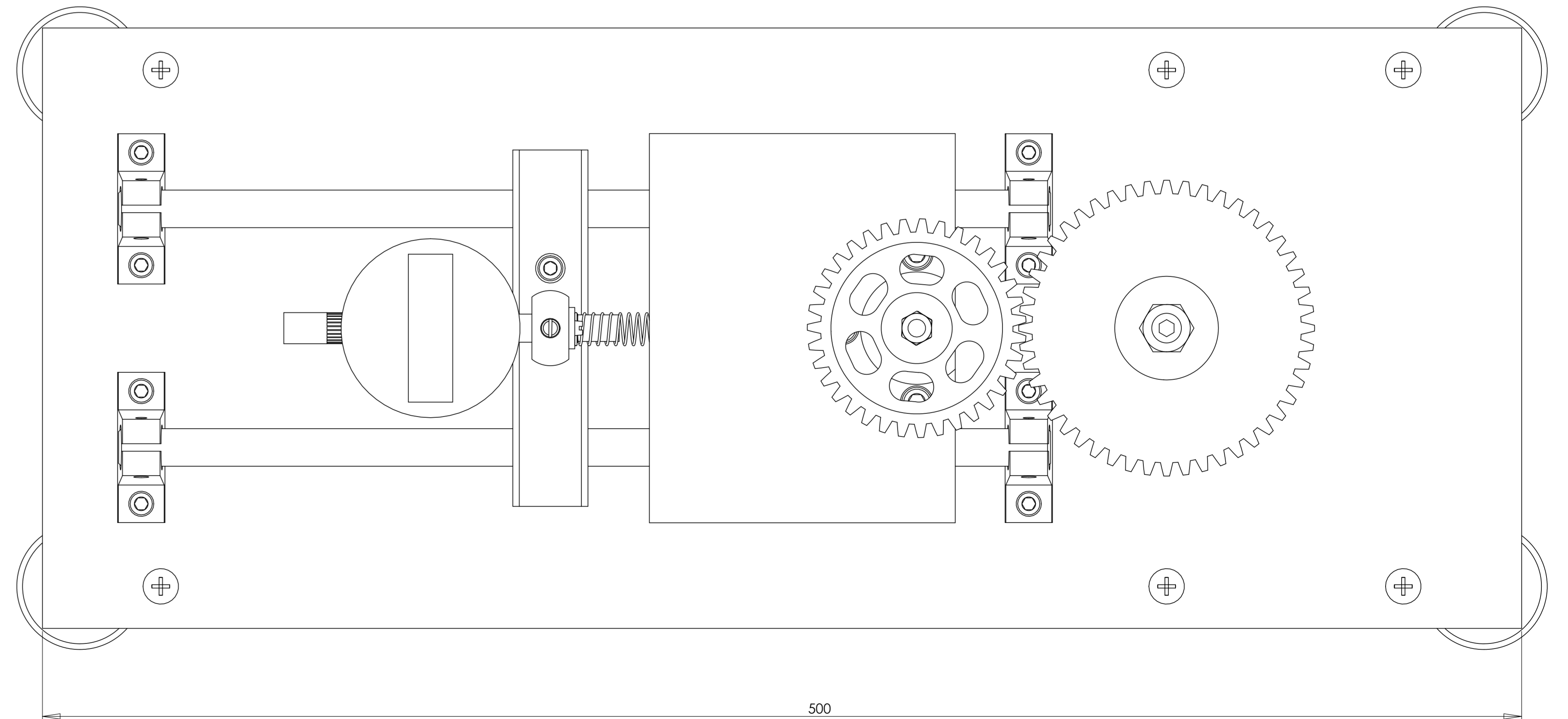
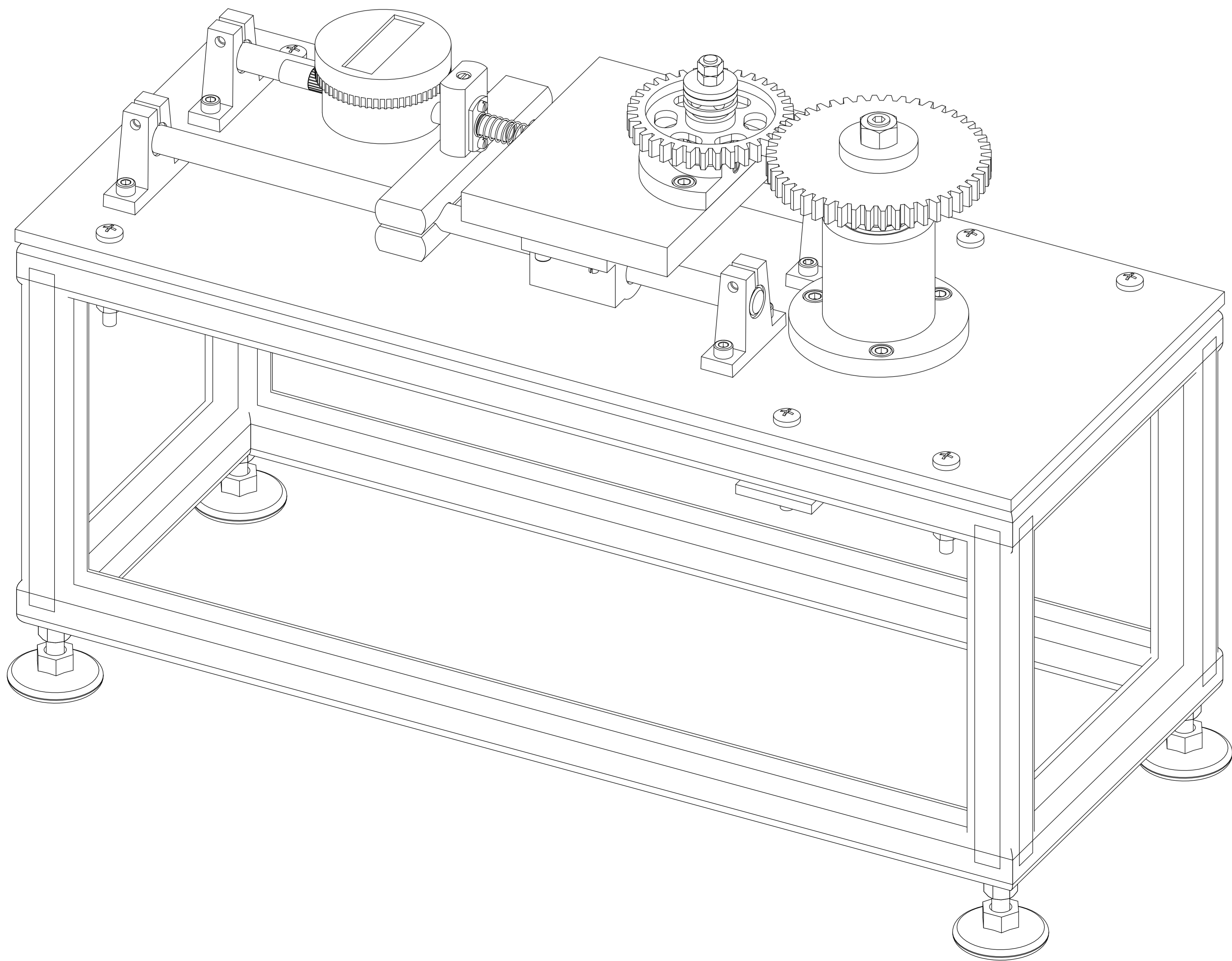
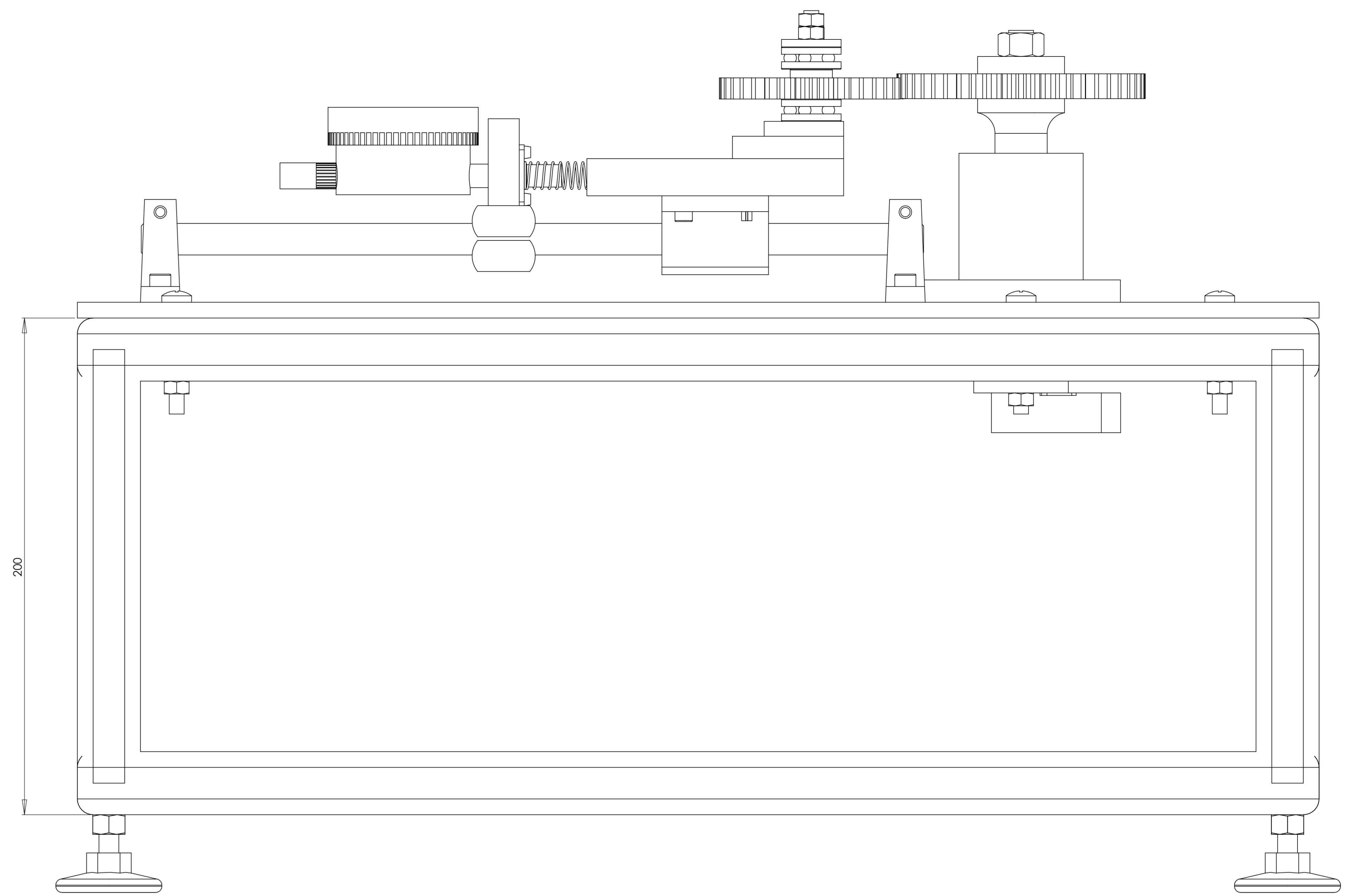
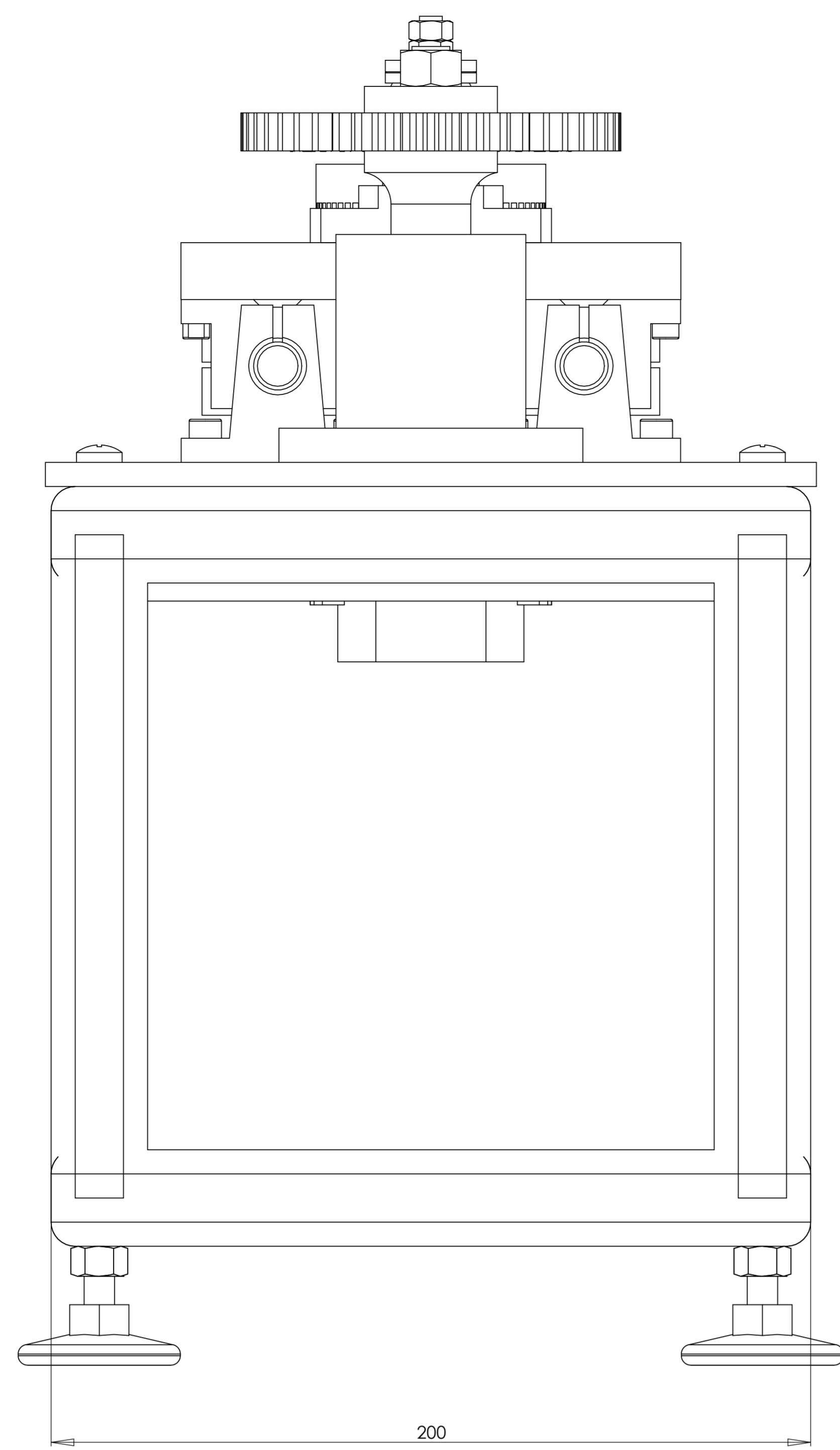
ANEXO B. Coeficiente So

Table 9 Guideline values for static safety factor s_0

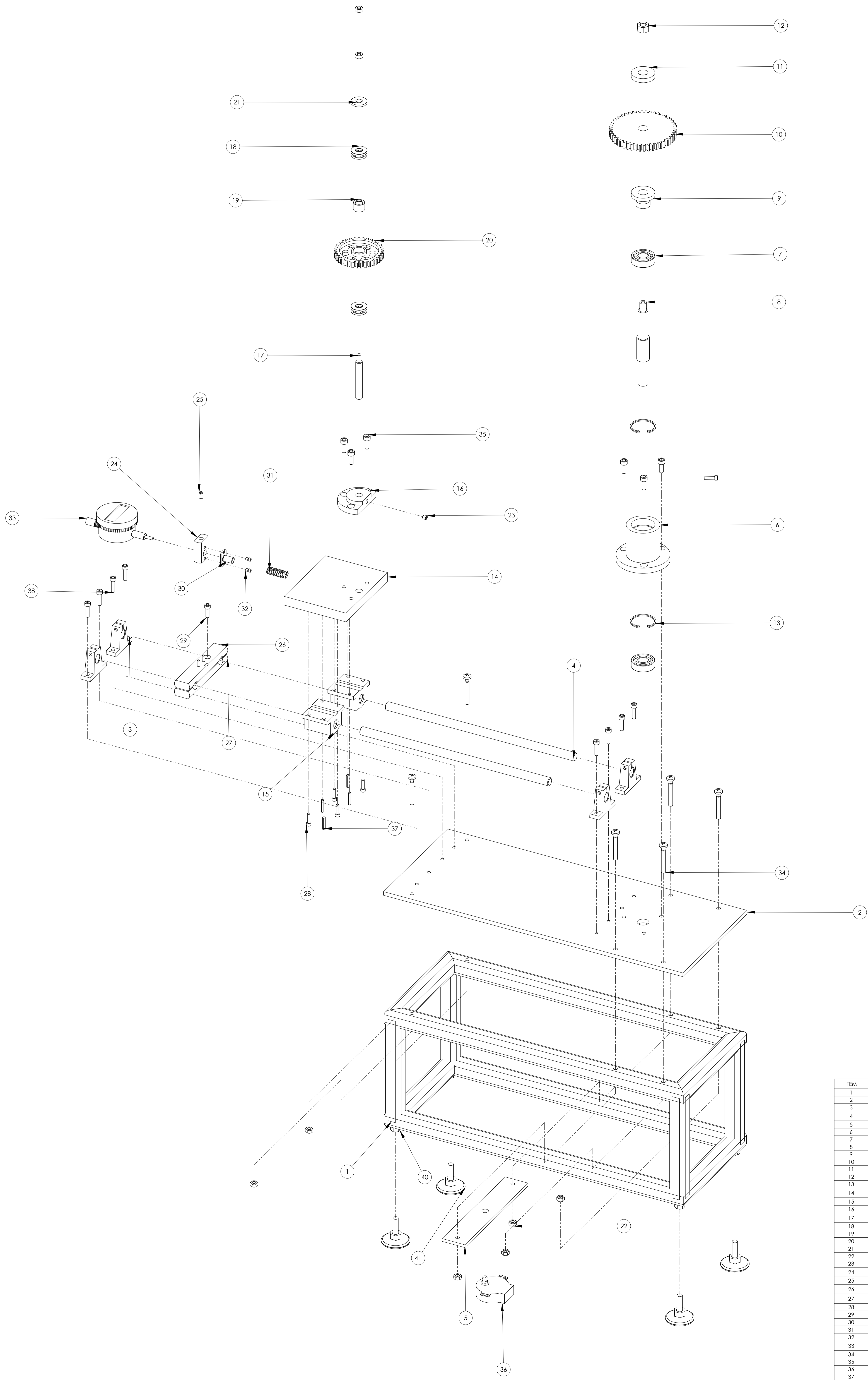
Type of operation	Rotating bearings						Non-rotating bearings	
	Requirements regarding quiet running						Ball bearings	Roller bearings
	unimportant		normal		high			
	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings
Smooth, vibration-free	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Pronounced shock loads	$\geq 1,5$	$\geq 2,5$	$\geq 1,5$	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Fuente: SKF Electronic Handbook

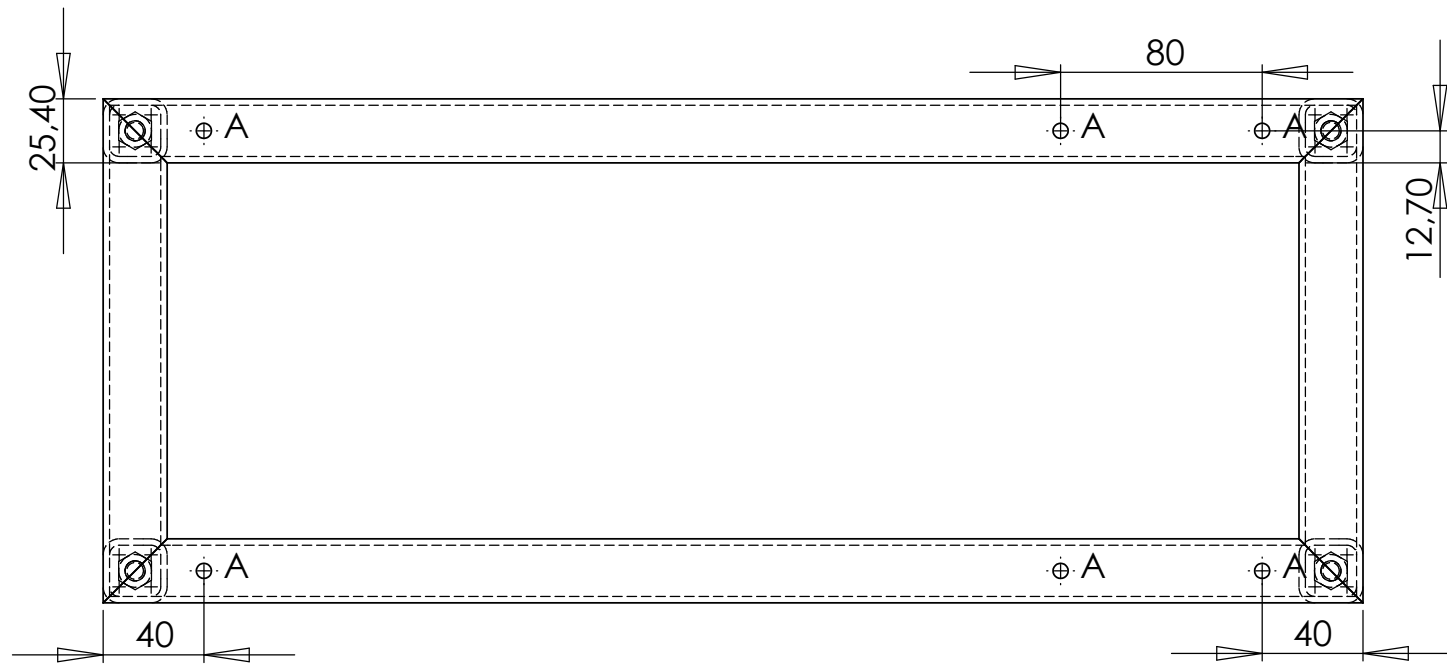
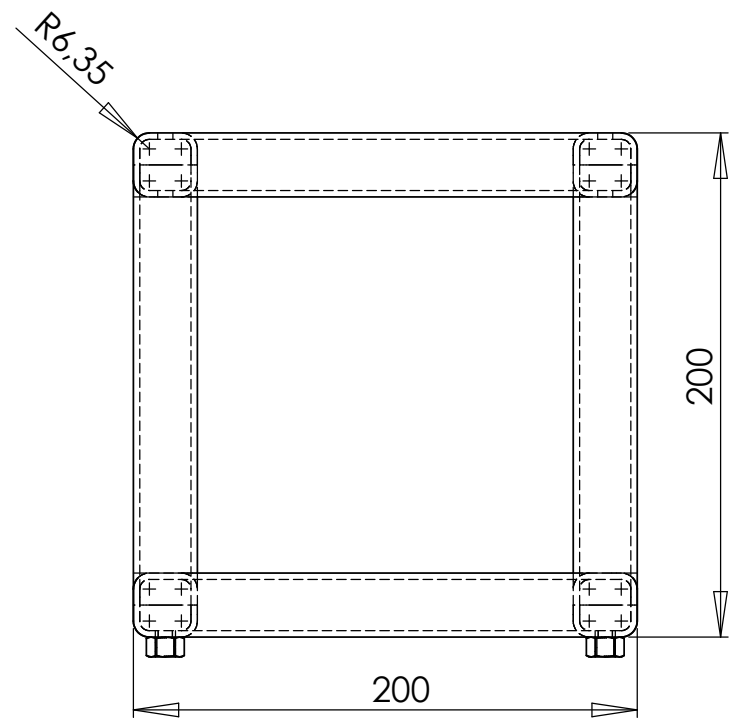
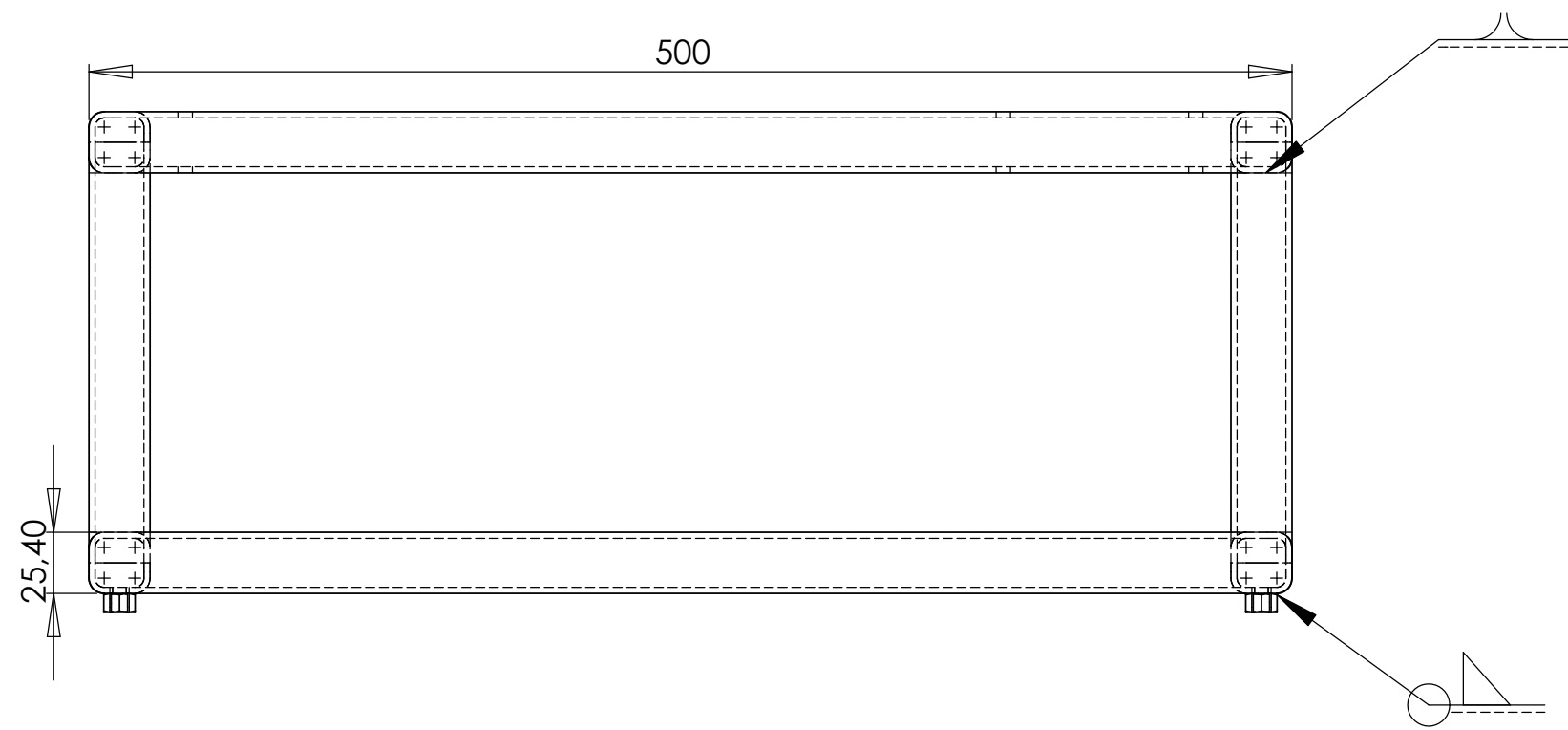
ANEXO C. Planos



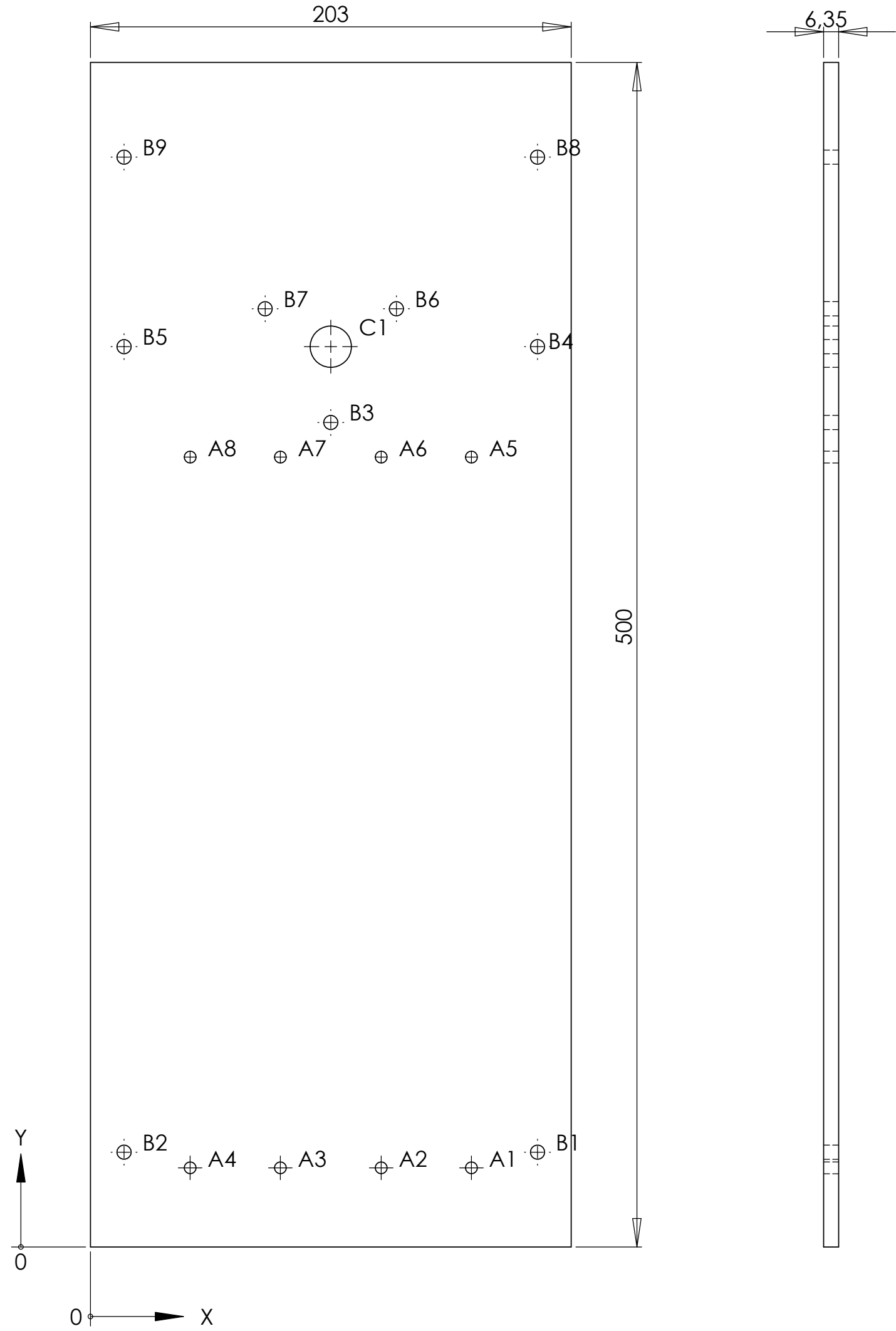
AO	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD	ESCUELA DE INGENIERIA
DIBUJO	02-11-07		INDUSTRIAL DE	MECANICA
COMPROBO			SANTANDER	
NORMA		ISO		
ESC.	BANCO EXPERIMENTAL			PROYECTO DE GRADO
1:1	PARA LA MEDICION DE			
1992837	LA DESVIACION RADIAL			
2000331	COMPUESTA TOTAL DE			LAMINA 1 DE 20
	ENGRANAJES RECTOS			



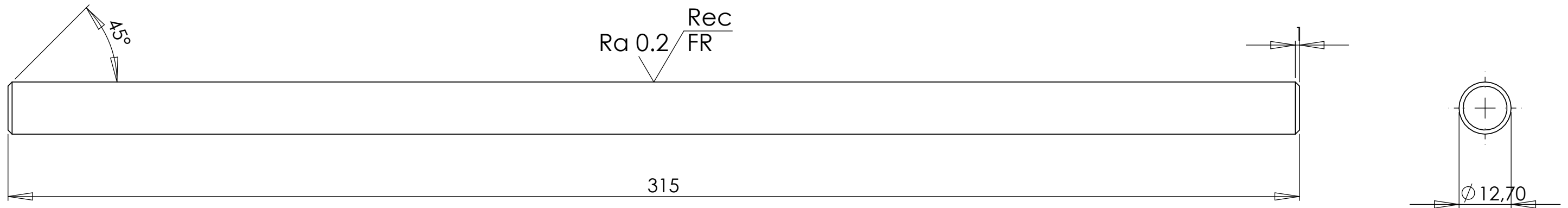
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	OBSERVACIONES
1	ESTRUCTURA	1	ACERO A-36
2	PLACA ESTRUCTURA	1	ACERO A-36
3	SOPORTE	4	THOMSON TSB-8
4	EJE	2	ACERO 304 RECTIFICADO
5	PLATINA MOTOR	1	ACERO 1020
6	BOSIN	1	ACERO 4140
7	RODAMIENTO DE BOLAS	2	SKF 6202
8	RISBLO	1	ACERO 1045
9	ANILLO	1	ACERO 1020
10	ENGRANAJE PRUEBA	1	PROLON, BAQUELITA
11	ARANDELA PRUEBA	1	ACERO 1020
12	TUERCA	1	M10
13	CHAVETA	2	I 35
14	PLACA	1	FUNDICION ALUMINIO
15	RODAMIENTO DE BOLAS RECIRCULANTES	2	THOMSON TSS6UPB-8
16	SOPORTE EJE PATRON	1	ACERO 1045
17	EJE PATRON	1	ACERO 1040 CROMADO
18	RODAMIENTO AXIAL	2	SKF 51100
19	RODAMIENTO DE AGUJAS	1	HK 1210
20	ENGRANAJE PATRON	1	GENERACION
21	ARANDELA PATRON	1	BRONCE
22	TUERCA	8	M6
23	PRISIONERO	1	BSC 6XB
24	PLATINA VERTICAL	1	ACERO A-36
25	PRISIONERO	1	BSC 6X10
26	PLATINA HORIZONTAL SUPERIOR	1	ACERO A-36
27	PLATINA HORIZONTAL INFERIOR	1	ACERO A-36
28	TORNILLO	7	BCC 4X16
29	TORNILLO	1	BCC 5X16
30	GUJA RESORTE	1	ALUMINIO
31	RESORTE	1	ACERO
32	TORNILLO	2	4X5
33	CARATULA	1	MITUTOYO 543-262
34	TORNILLO	6	Boh ISO 6x45
35	TORNILLO	6	BCC M6X16
36	MOTOR	1	GM-16-12F32
37	PIN ELASTICO	4	4X15
38	TORNILLO	8	BCC 5X20
39	TUERCA	8	M5
40	TUERCA	4	M8
41	TORNILLO NIVELADOR	4	M8



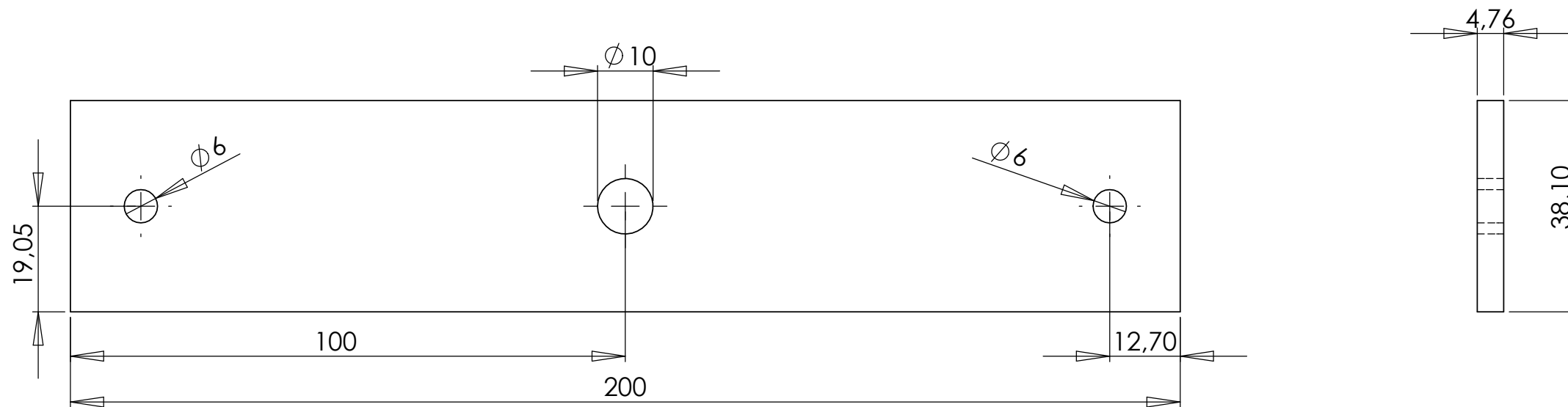
RÓTULO		TAMAÑO		CANTIDAD
A		Ø 6 POR TODO		6
A3	FECHA	NOMBRE		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESC:	ESTRUCTURA			PROYECTO DE GRADO
1:3				LAMINA 3 DE 20
ACERO A-36				



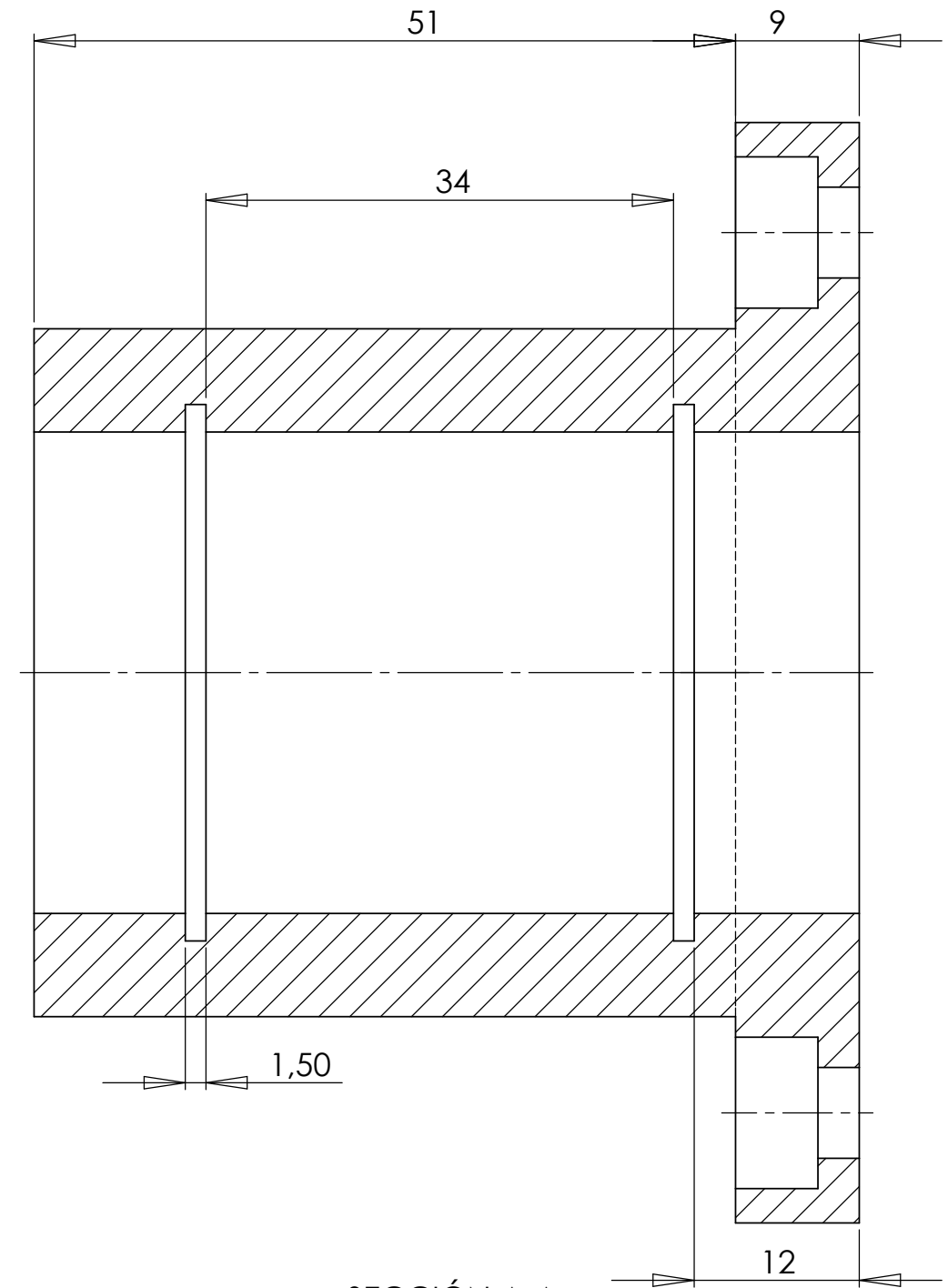
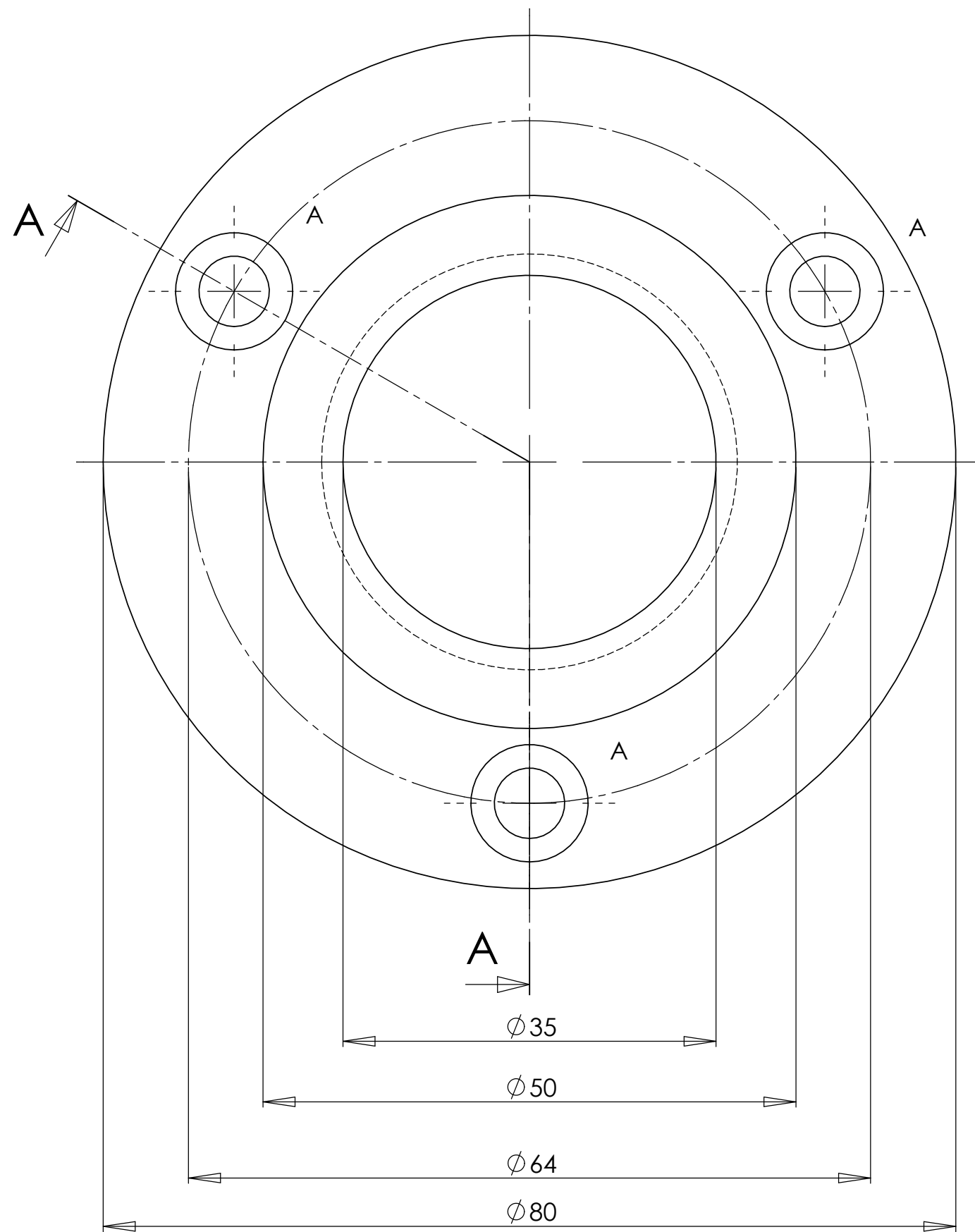
RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO	
A1	160.89	33.40	Ø 5 POR TODO	
A2	122.79	33.40	Ø 5 POR TODO	
A3	80.22	33.40	Ø 5 POR TODO	
A4	42.12	33.40	Ø 5 POR TODO	
A5	160.89	333.40	Ø 5 POR TODO	
A6	122.79	333.40	Ø 5 POR TODO	
A7	80.22	333.40	Ø 5 POR TODO	
A8	42.12	333.40	Ø 5 POR TODO	
B1	188.80	40	Ø 6 POR TODO	
B2	14.20	40	Ø 6 POR TODO	
B3	101.50	348	Ø 6 POR TODO	
B4	188.80	380	Ø 6 POR TODO	
B5	14.20	380	Ø 6 POR TODO	
B6	129.21	396	Ø 6 POR TODO	
B7	73.79	396	Ø 6 POR TODO	
B8	188.80	460	Ø 6 POR TODO	
B9	14.20	460	Ø 6 POR TODO	
C1	101.50	380	Ø 17.46 POR TODO	
A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 1:2	PLACA ESTRUCTURA		PROYECTO DE GRADO	
ACERO A-36			LAMINA 4 DE 20	



A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 1:1	EJE			PROYECTO DE GRADO
ACERO 304				LAMINA 5 DE 20

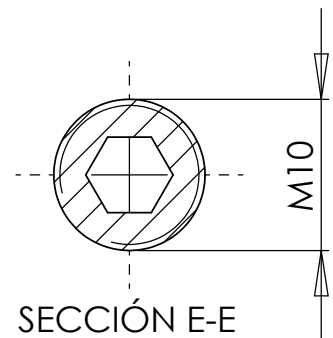
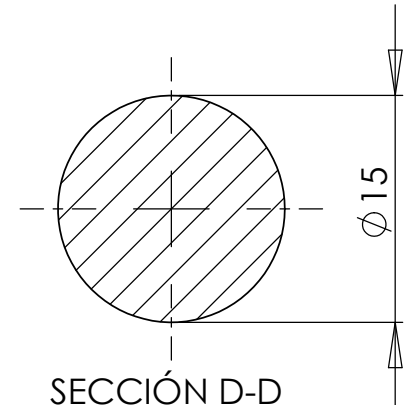
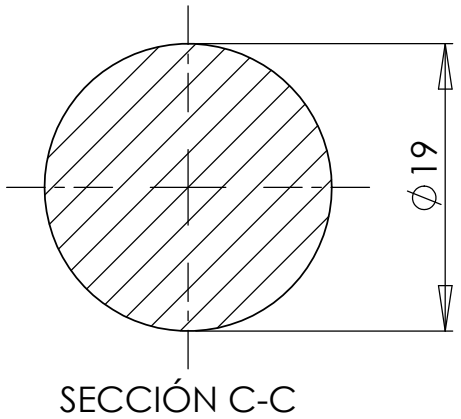
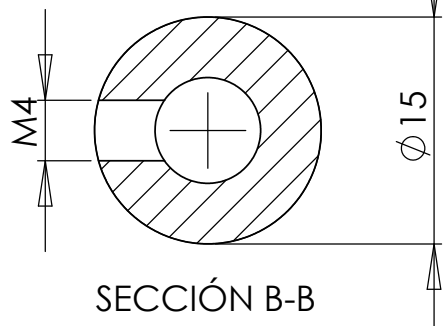
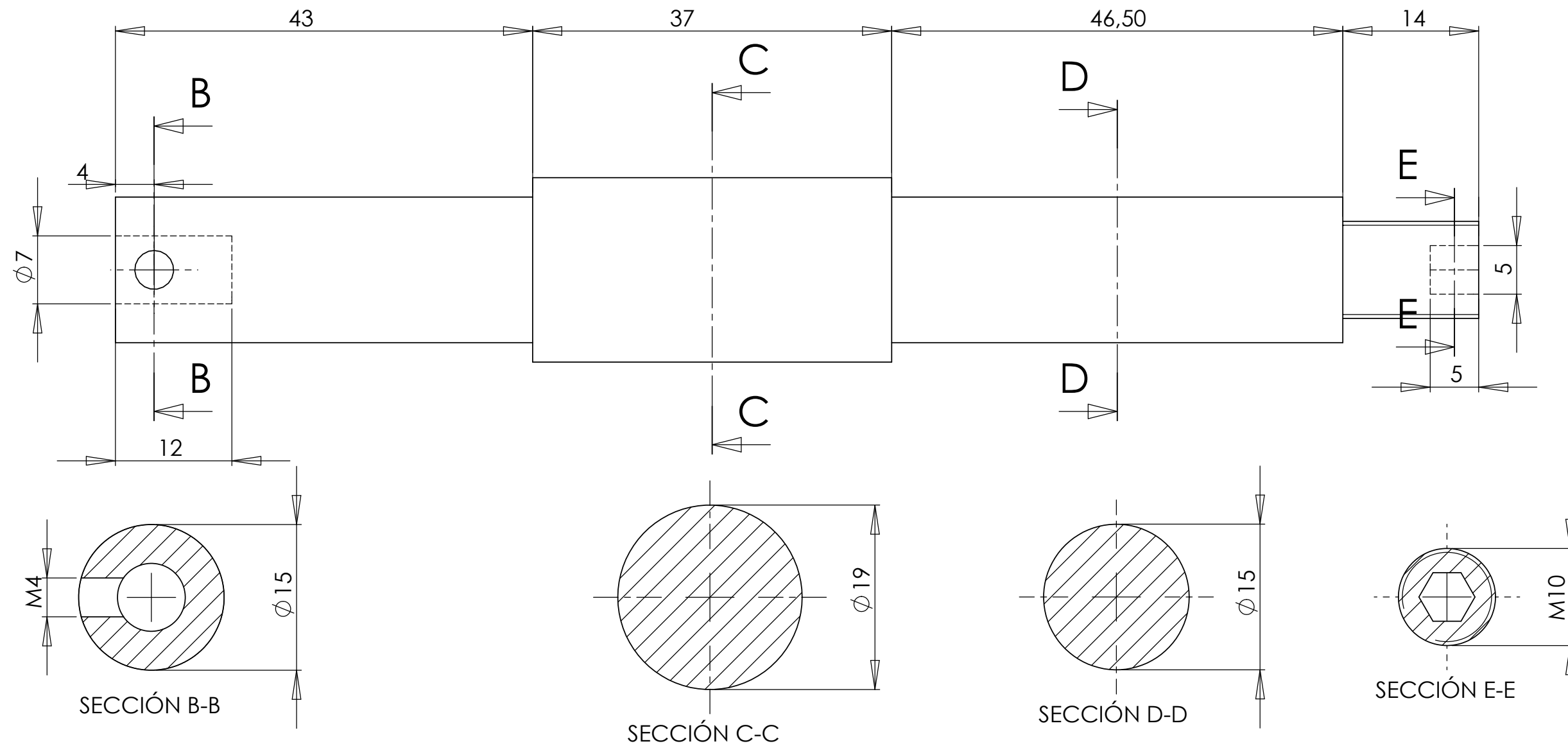


A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 1:1	PLATINA MOTOR			PROYECTO DE GRADO
ACERO 1020				LAMINA 6 DE 20

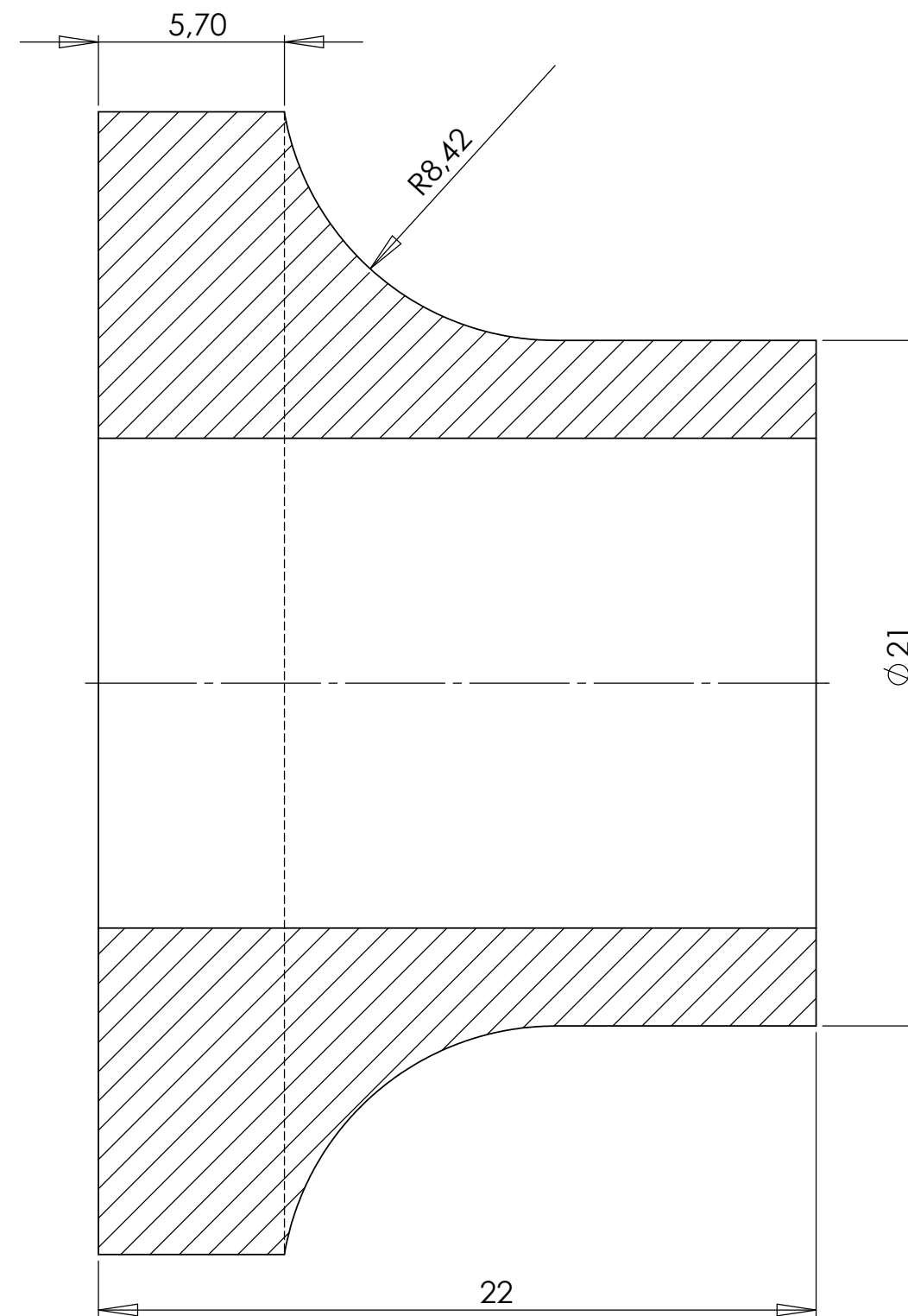
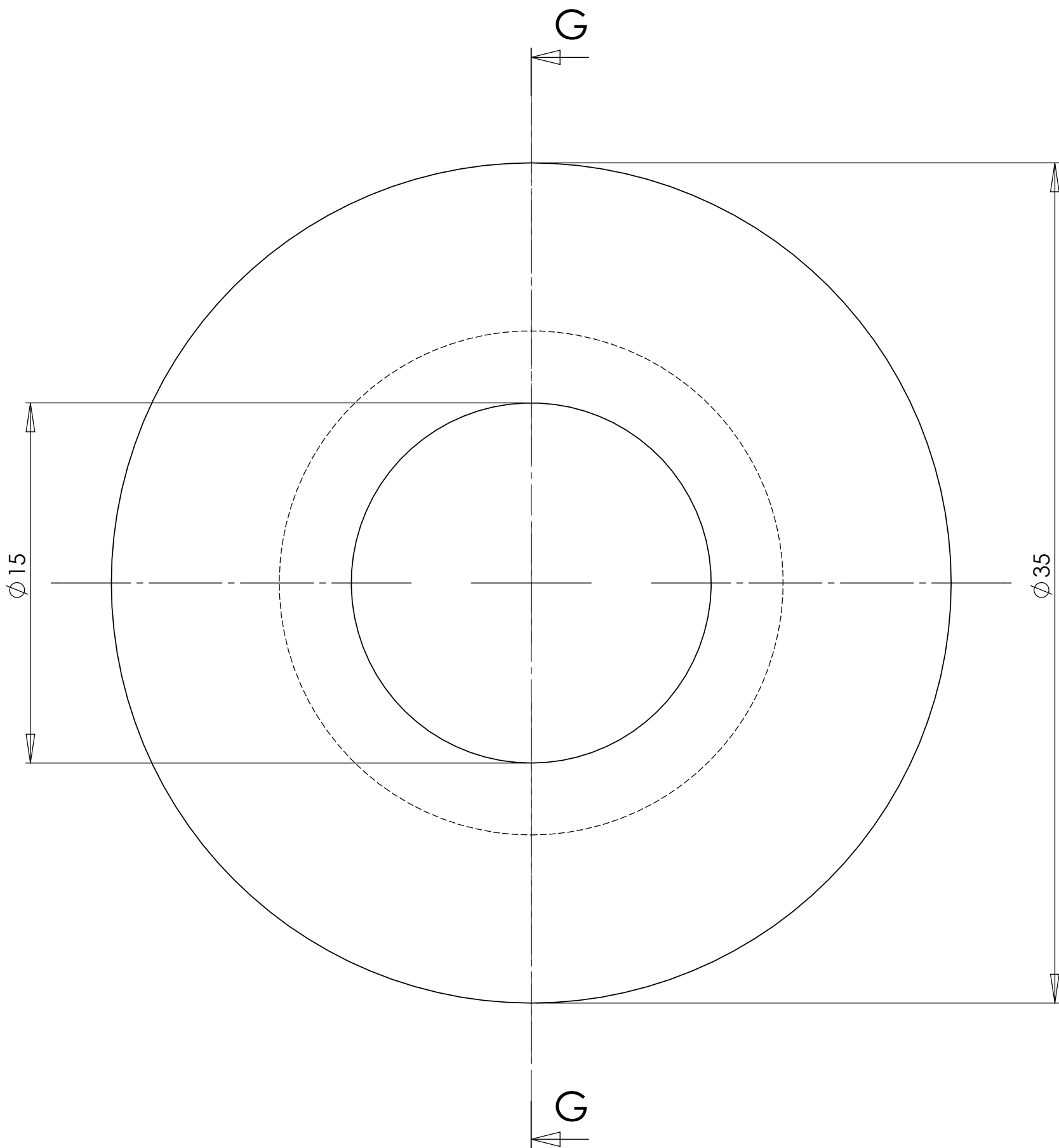


SECCIÓN A-A

RÓTULO		TAMAÑO		CANTIDAD
A		REFRENTADO BCCM6		3
A3	FECHA	NOMBRE		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
ESC:	BOSIN			PROYECTO DE GRADO
2:1				LAMINA 7 DE 20
ACERO 4140				

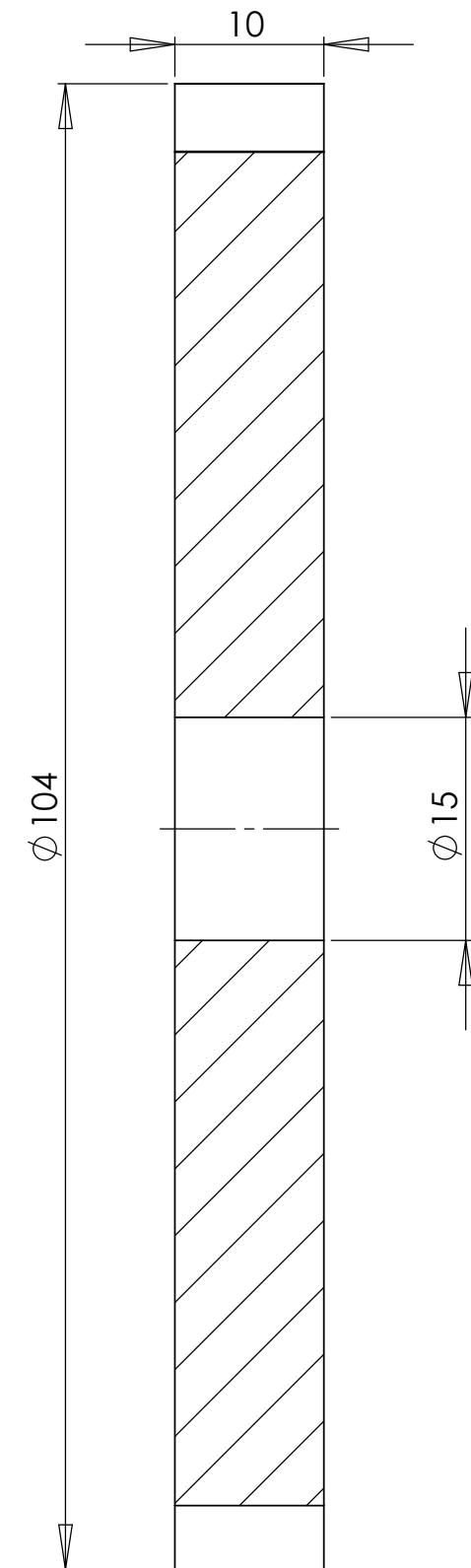
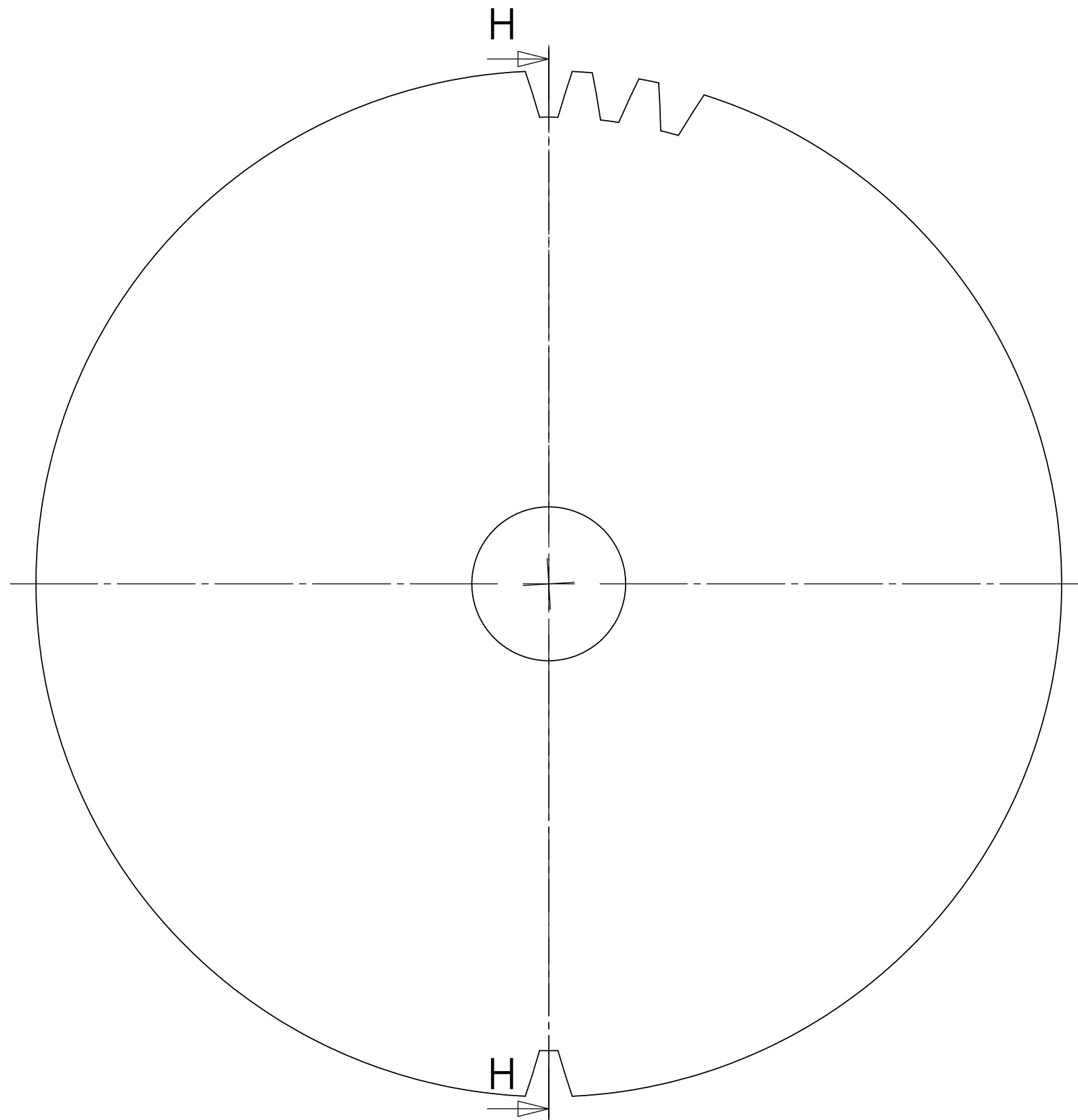


A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC:	HUSILLO			PROYECTO DE GRADO
2:1				
ACERO 1045				LAMINA 8 DE 20



SECCIÓN G-G

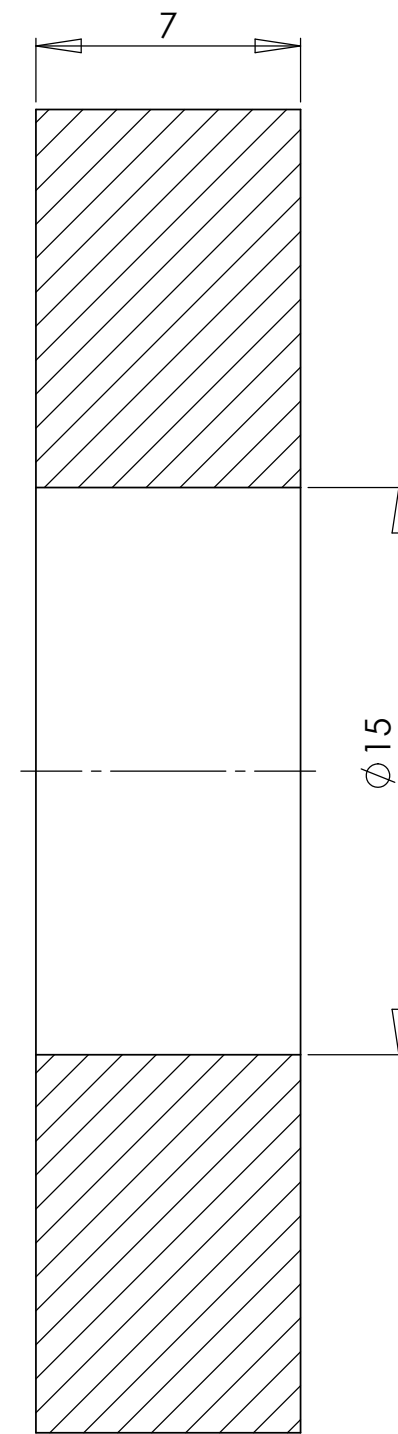
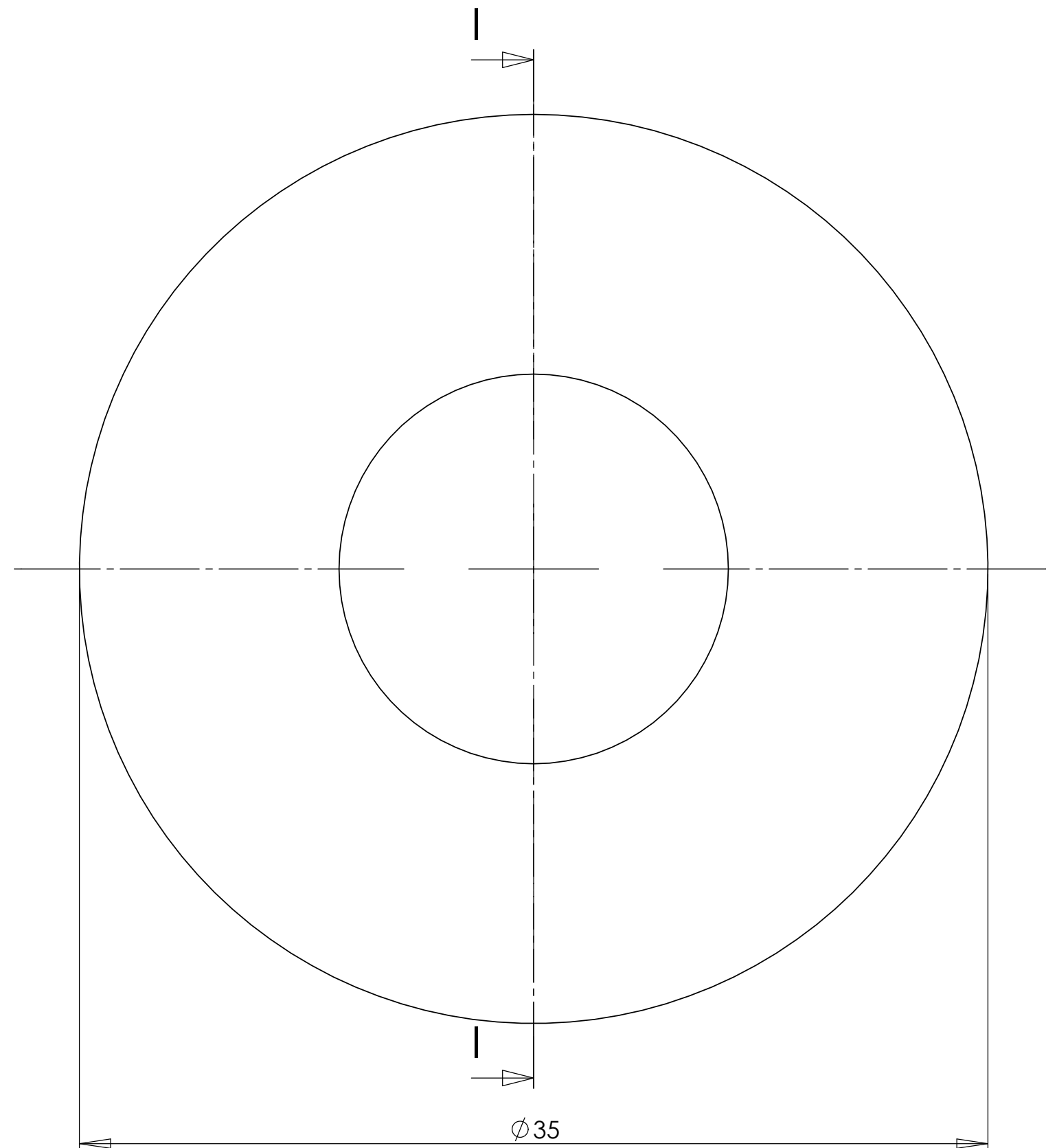
A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 5:1	ANILLO			PROYECTO DE GRADO
ACERO 1020				LAMINA 9 DE 20



MODULO: 2
 ANGULO DE PRESION: 20
 N° DE DIENTES: 50
 De: 104 mm

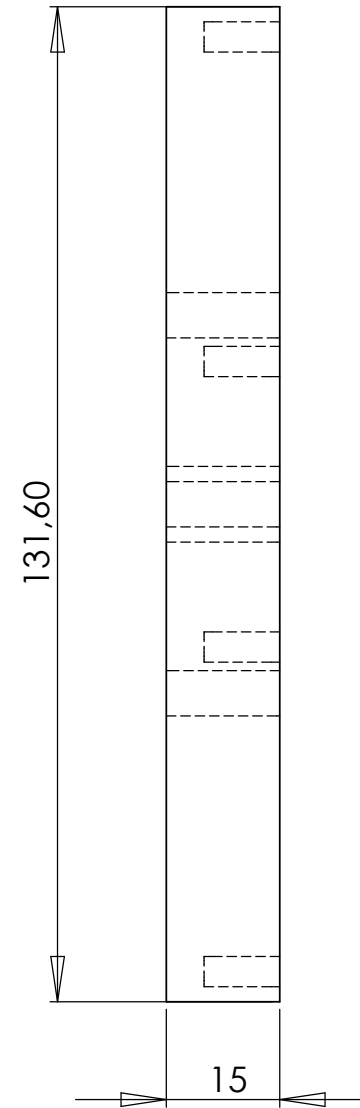
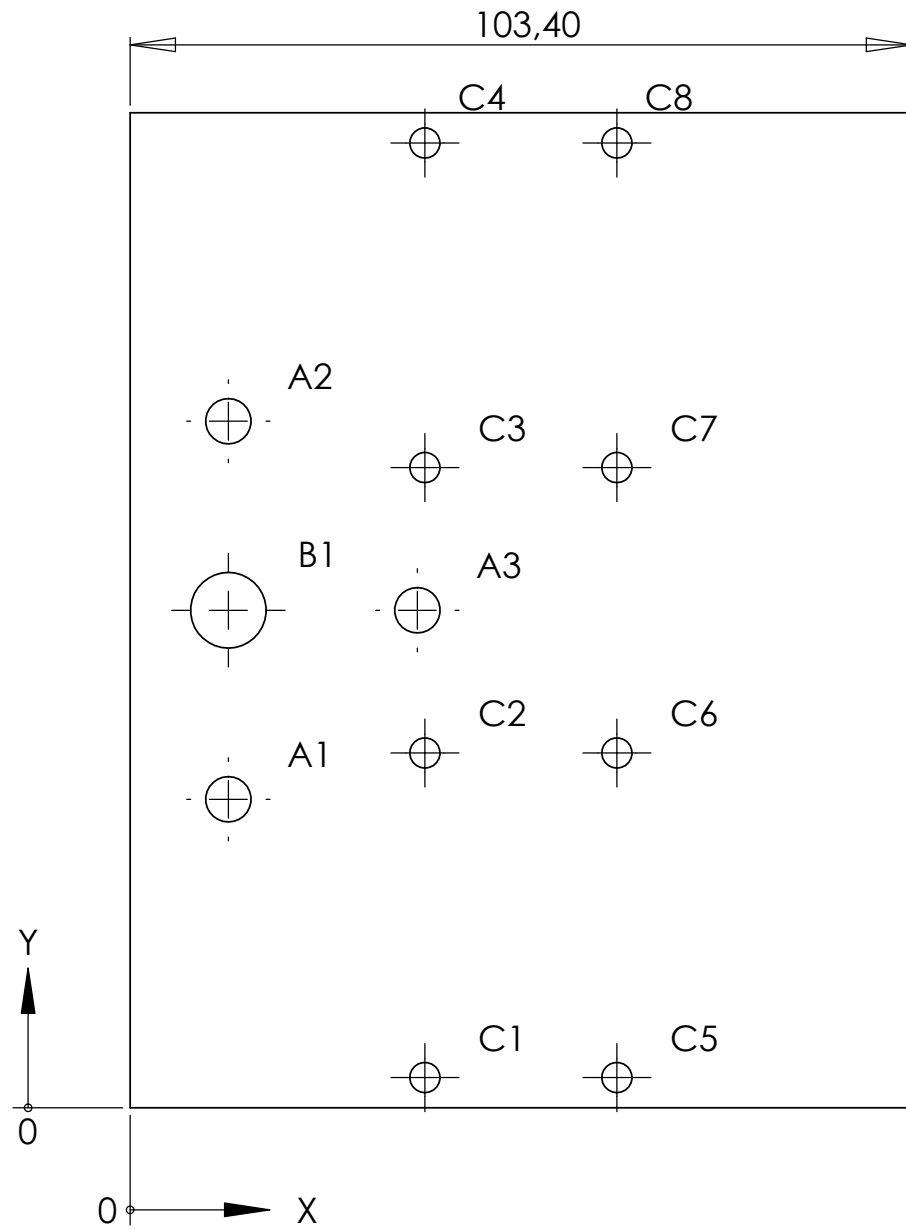
SECCION H-H

A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 2:1	ENGRANAJE PRUEBA			PROYECTO DE GRADO
ACERO PROLON BAQUELITA				LAMINA 10 DE 20



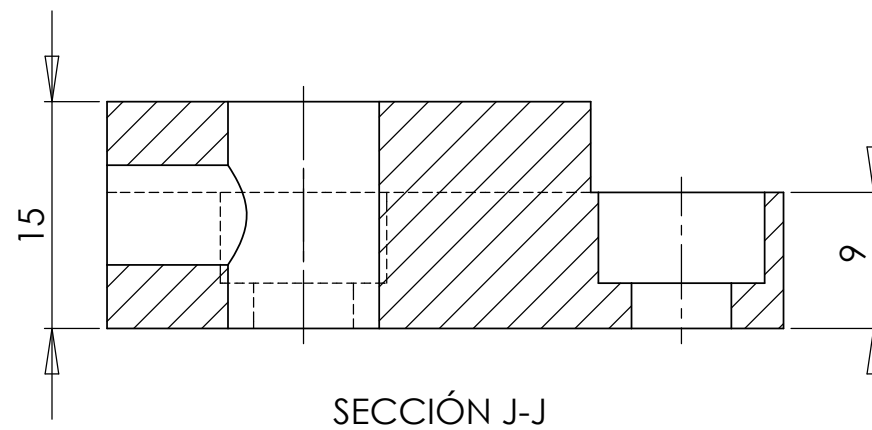
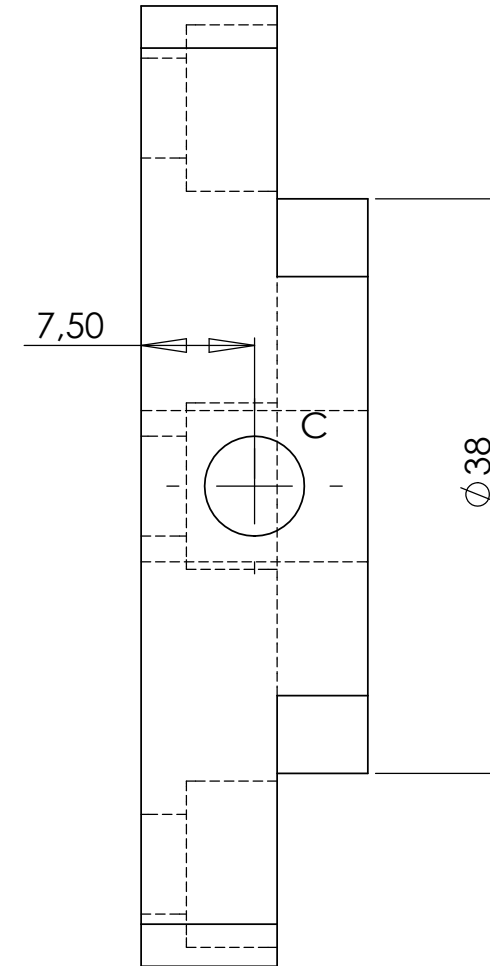
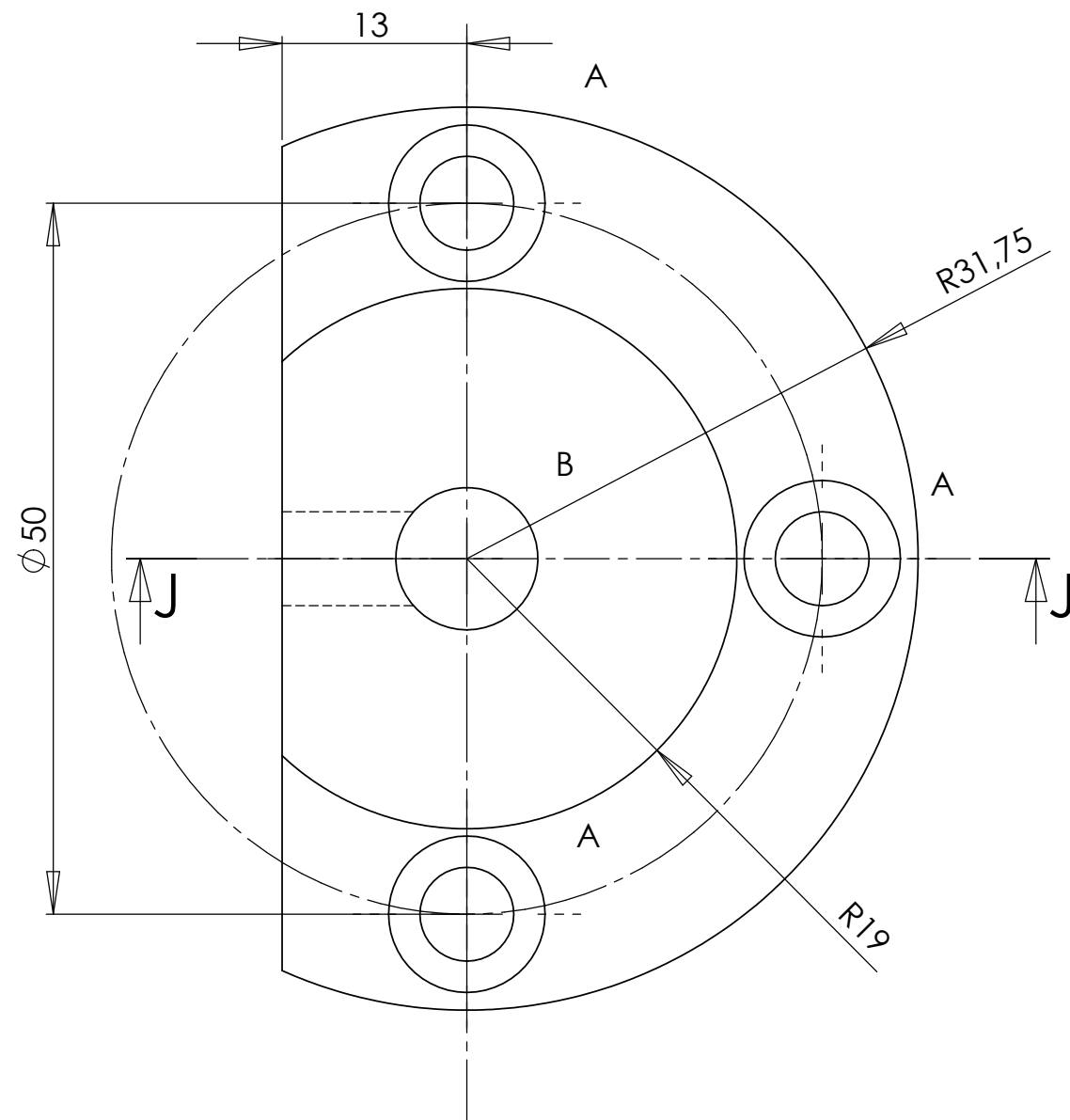
SECCIÓN I-I

A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 5:1	ARANDELA PRUEBA			PROYECTO DE GRADO
ACERO 1020				LAMINA 11 DE 20

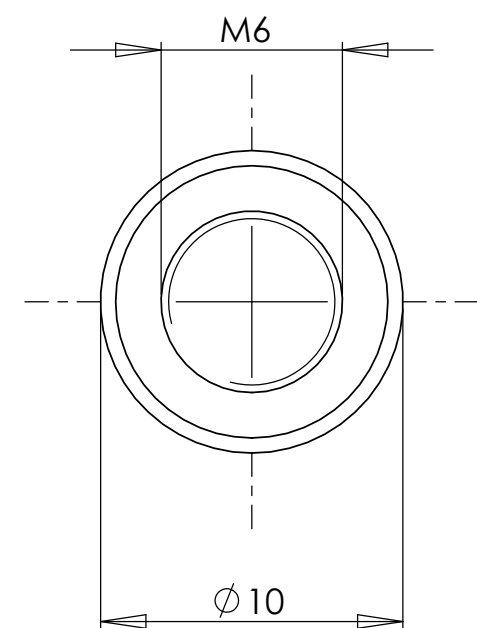
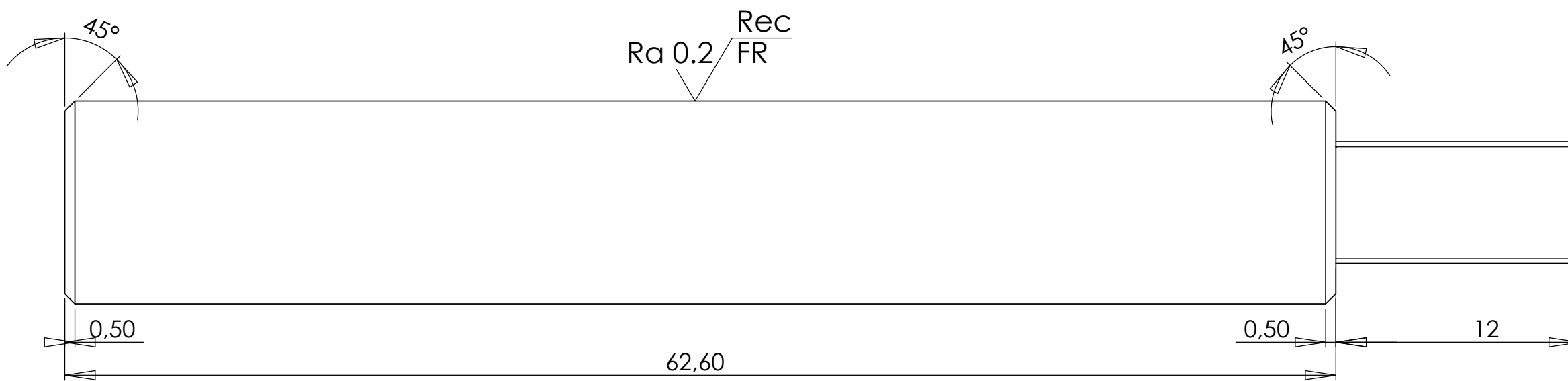


RÓTULO	UBIC X	UBIC Y	TAMAÑO
A1	13	40.80	TALADRO M6 POR TODO
A2	13	90.80	TALADRO M6 POR TODO
A3	38	65.80	TALADRO M6 POR TODO
B1	13	65.80	Ø 10 POR TODO
C1	39	4	TALADRO M4 POR 10
C2	39	46.93	TALADRO M4 POR 10
C3	39	84.67	TALADRO M4 POR 10
C4	39	127.60	TALADRO M4 POR 10
C5	64.40	4	TALADRO M4 POR 10
C6	64.40	46.93	TALADRO M4 POR 10
C7	64.40	84.67	TALADRO M4 POR 10
C8	64.40	127.60	TALADRO M4 POR 10

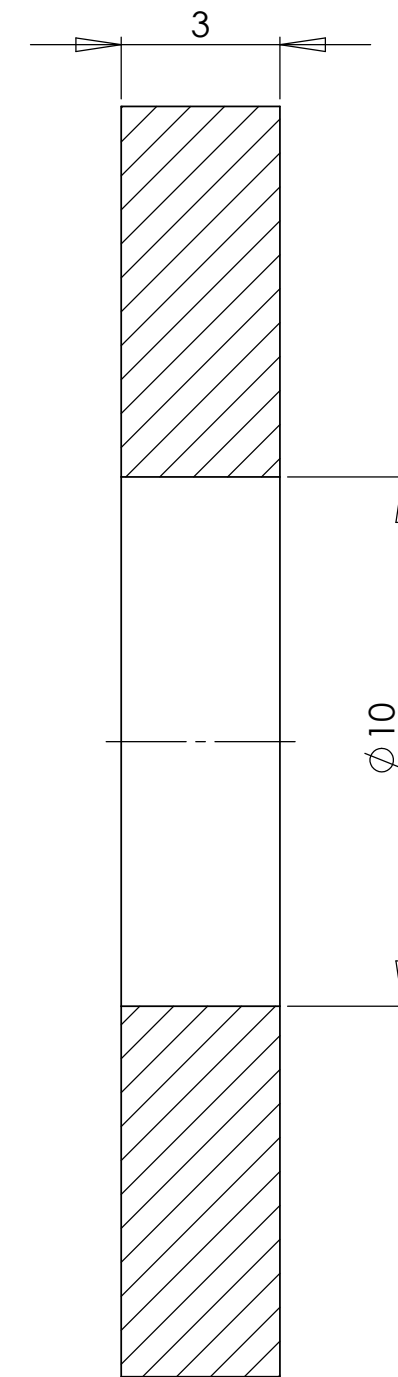
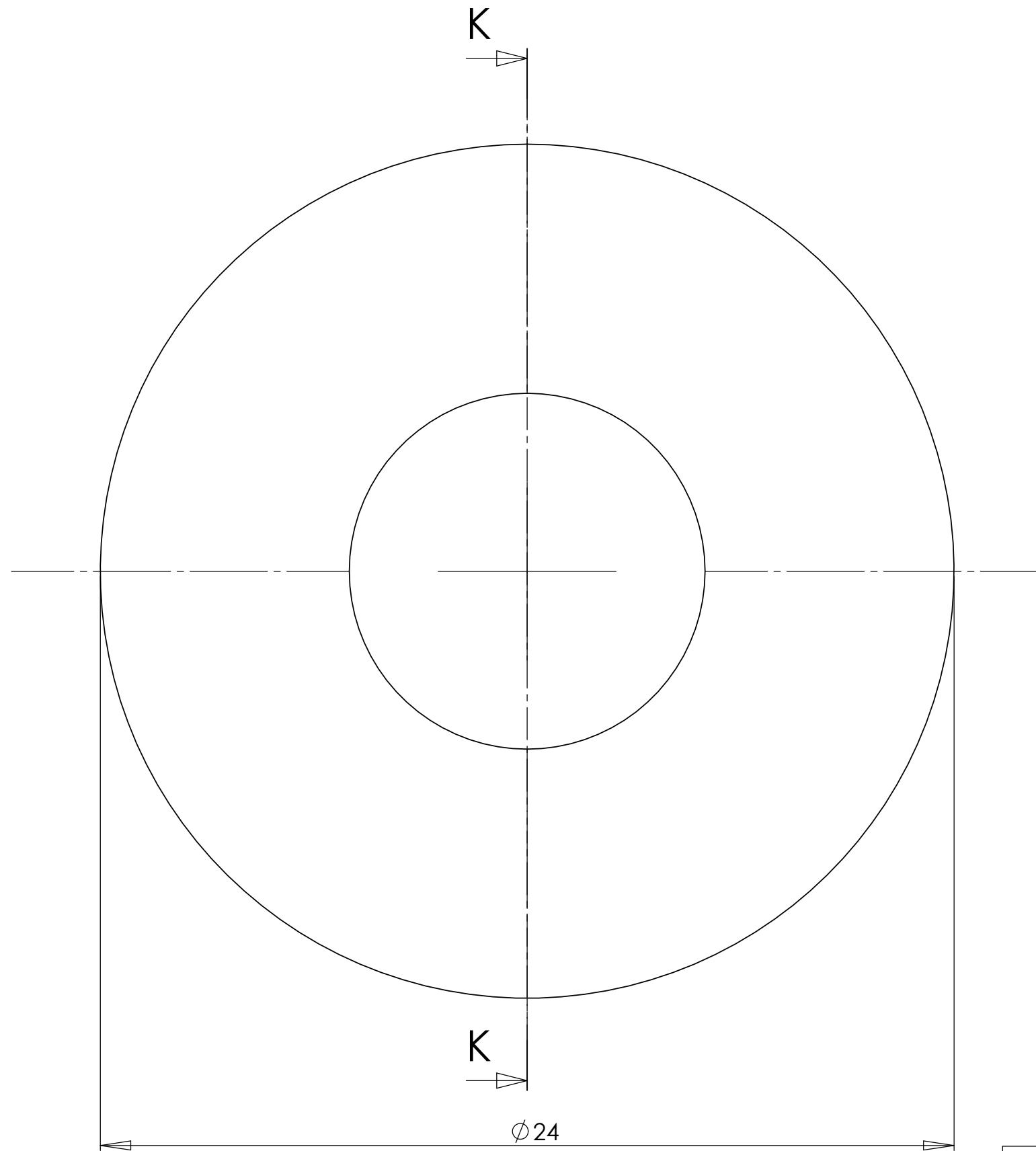
A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 1:1	PLACA DESLIZANTE			PROYECTO DE GRADO
FUNDICION ALUMINIO				LAMINA 12 DE 20



RÓTULO		TAMAÑO	CANTIDAD
A		REFRENTADO M6	3
B		$\phi 10$	1
C		TALADRO M6	1
A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331	
COMPROBO			
NORMA		ISO	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
ESC: 2:1	SOPORTE EJE PATRON		PROYECTO DE GRADO
ACERO 1045			LAMINA 13 DE 20

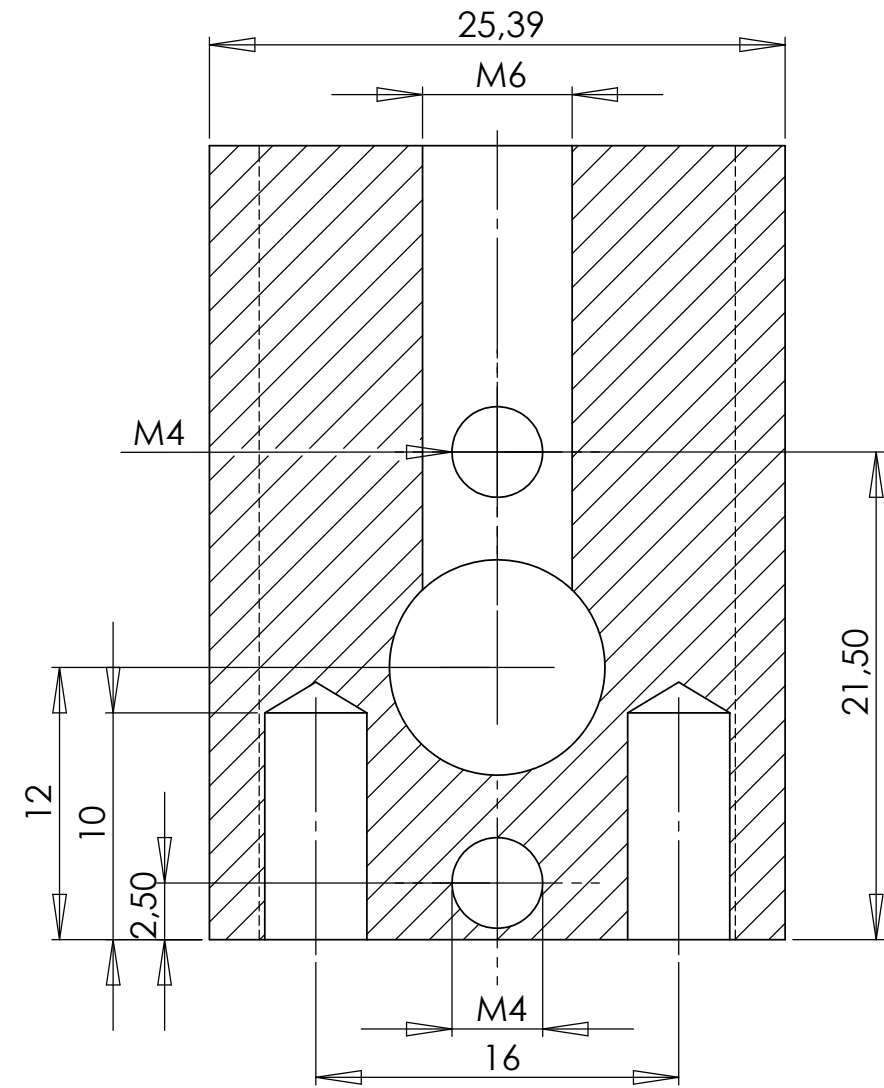
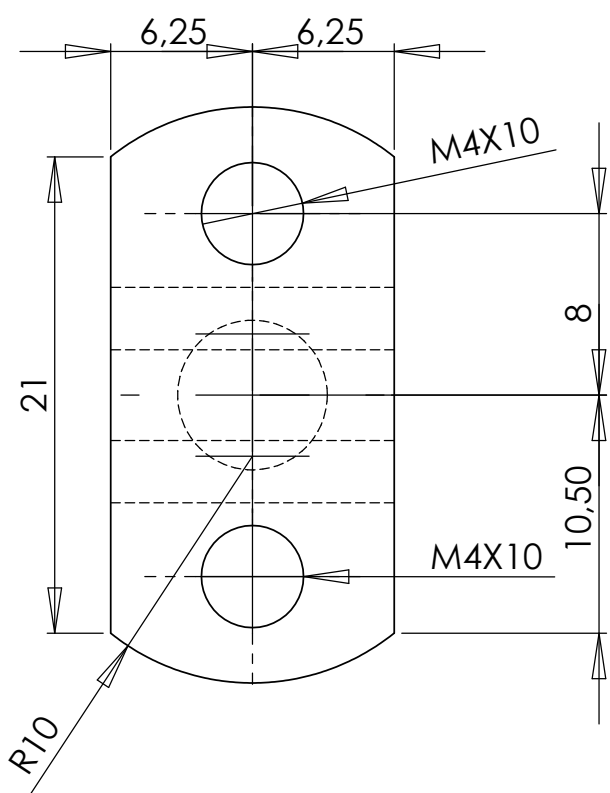
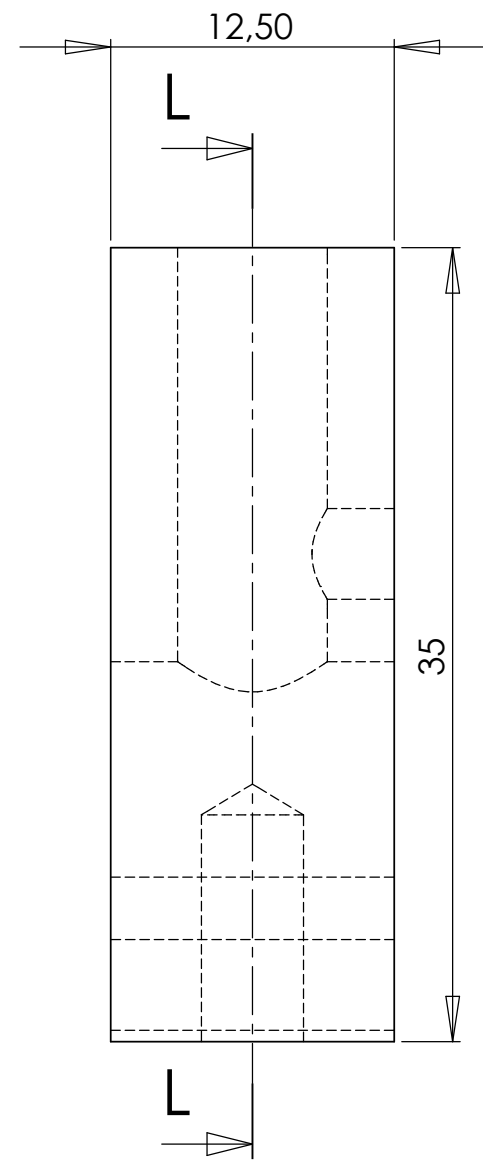


A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 4:1	EJE PATRON			PROYECTO DE GRADO
ACERO 1040				LAMINA 14 DE 20



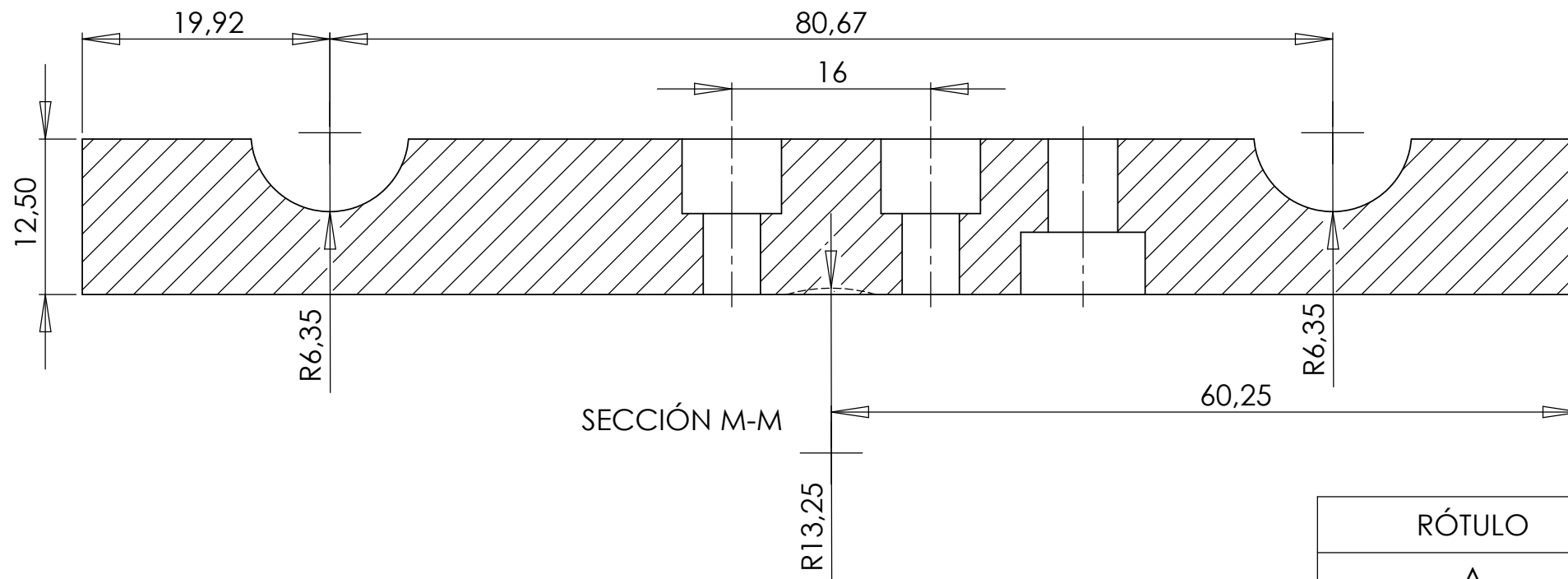
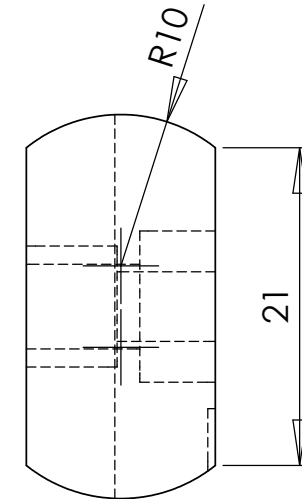
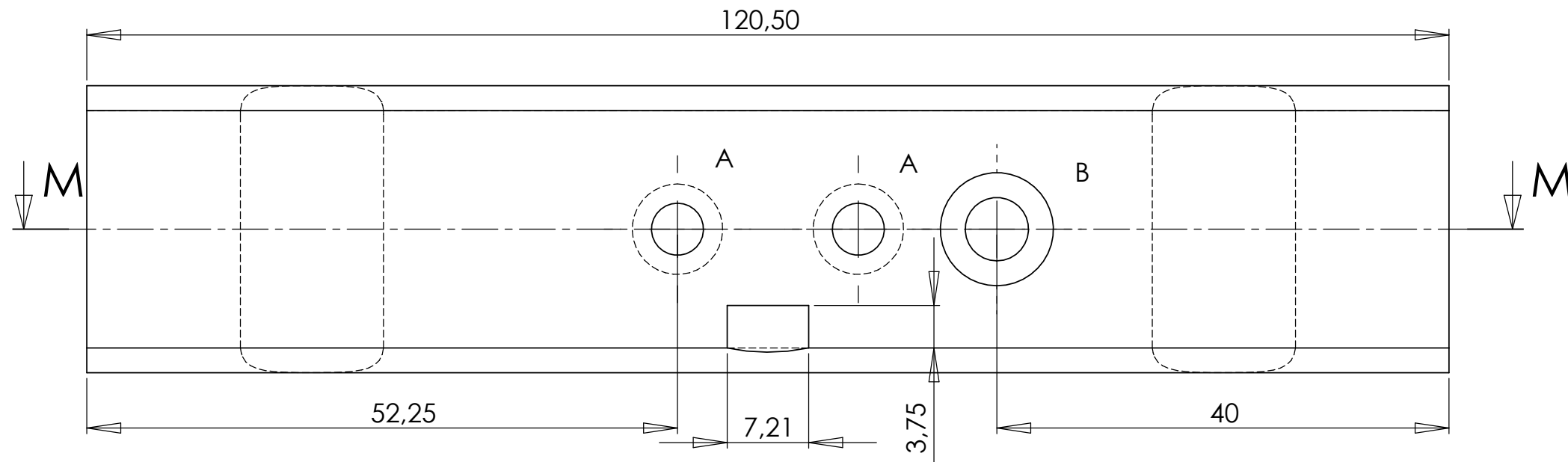
SECCIÓN K-K

A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 7:1	ARANDELA PATRON			PROYECTO DE GRADO
BRONCE				LAMINA 15 DE 20

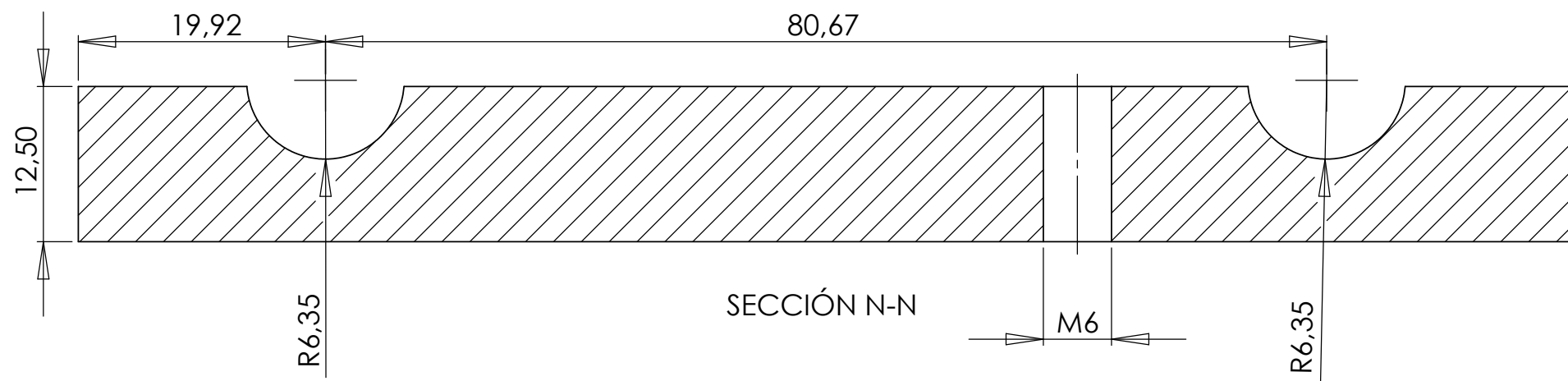
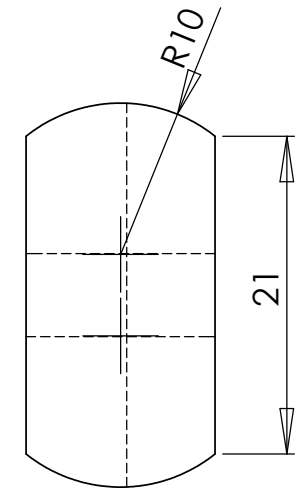
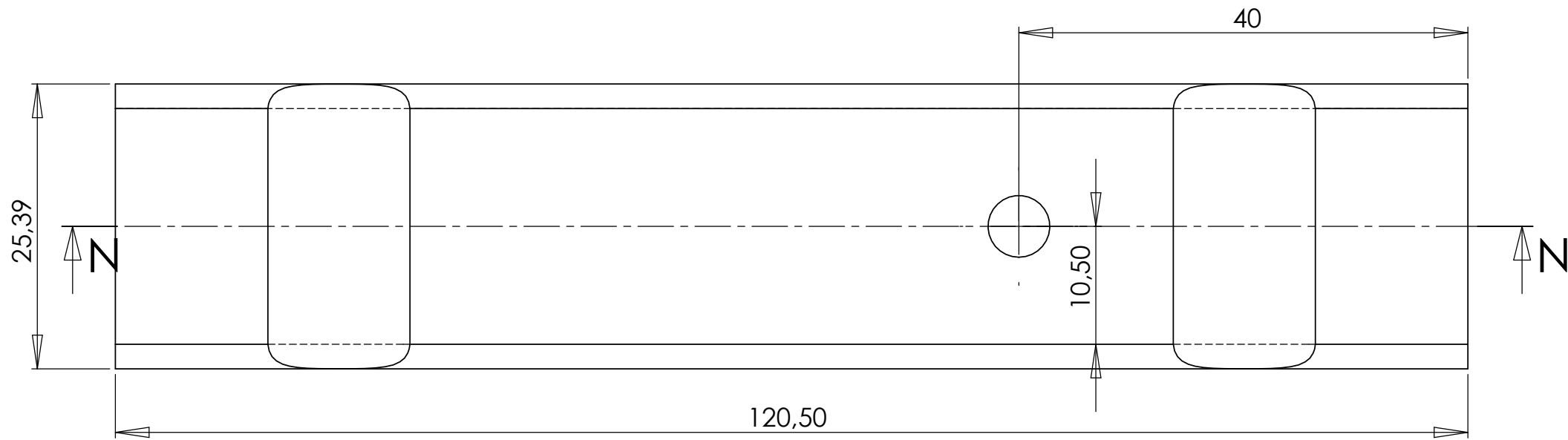


SECCIÓN L-L

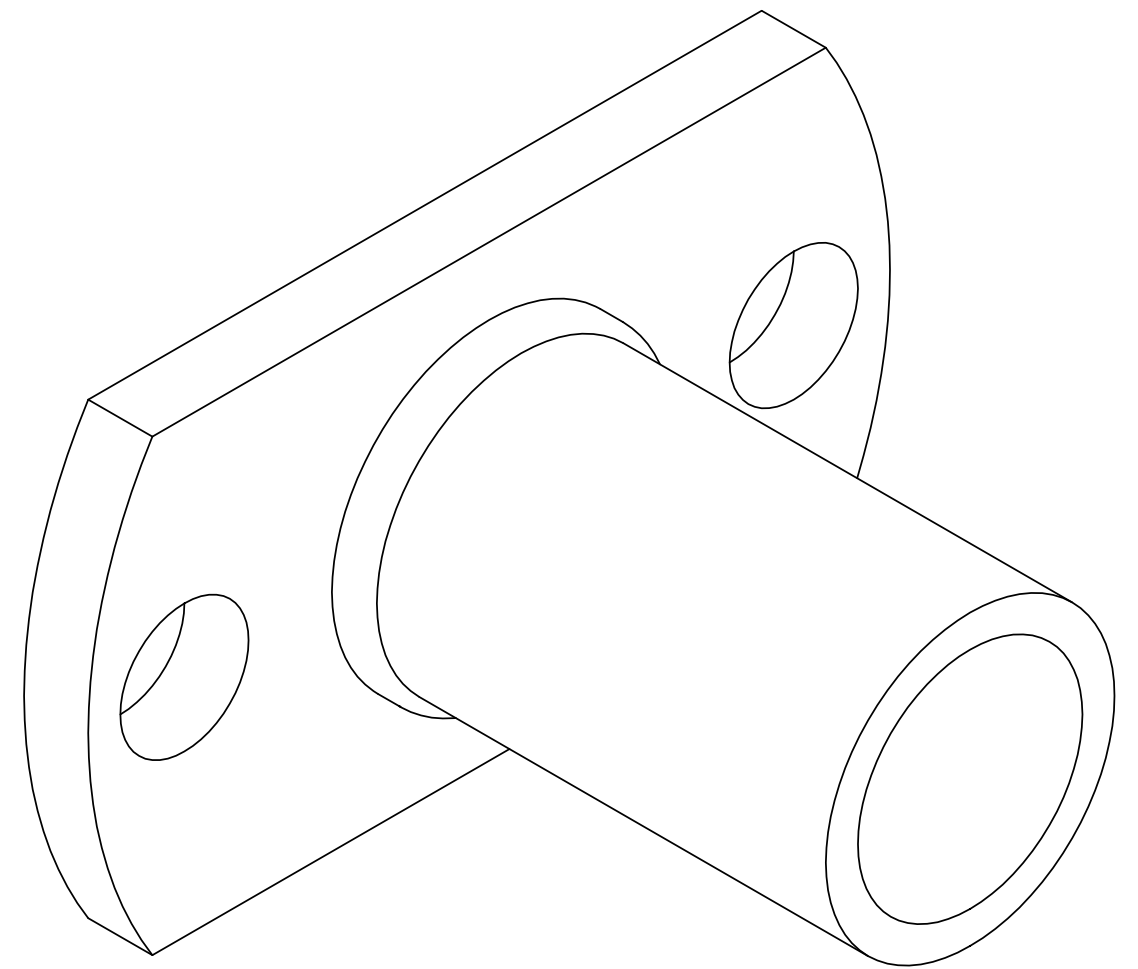
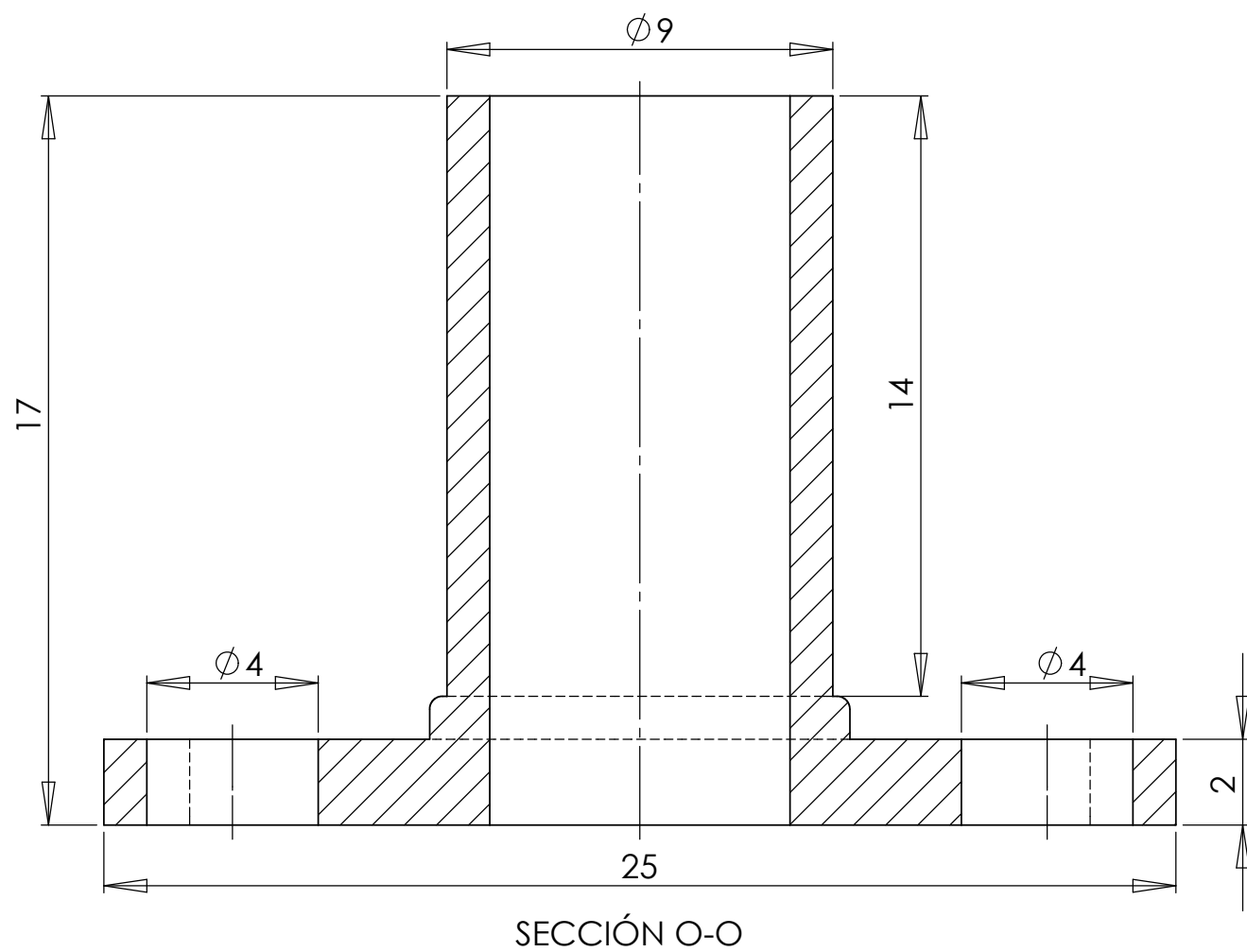
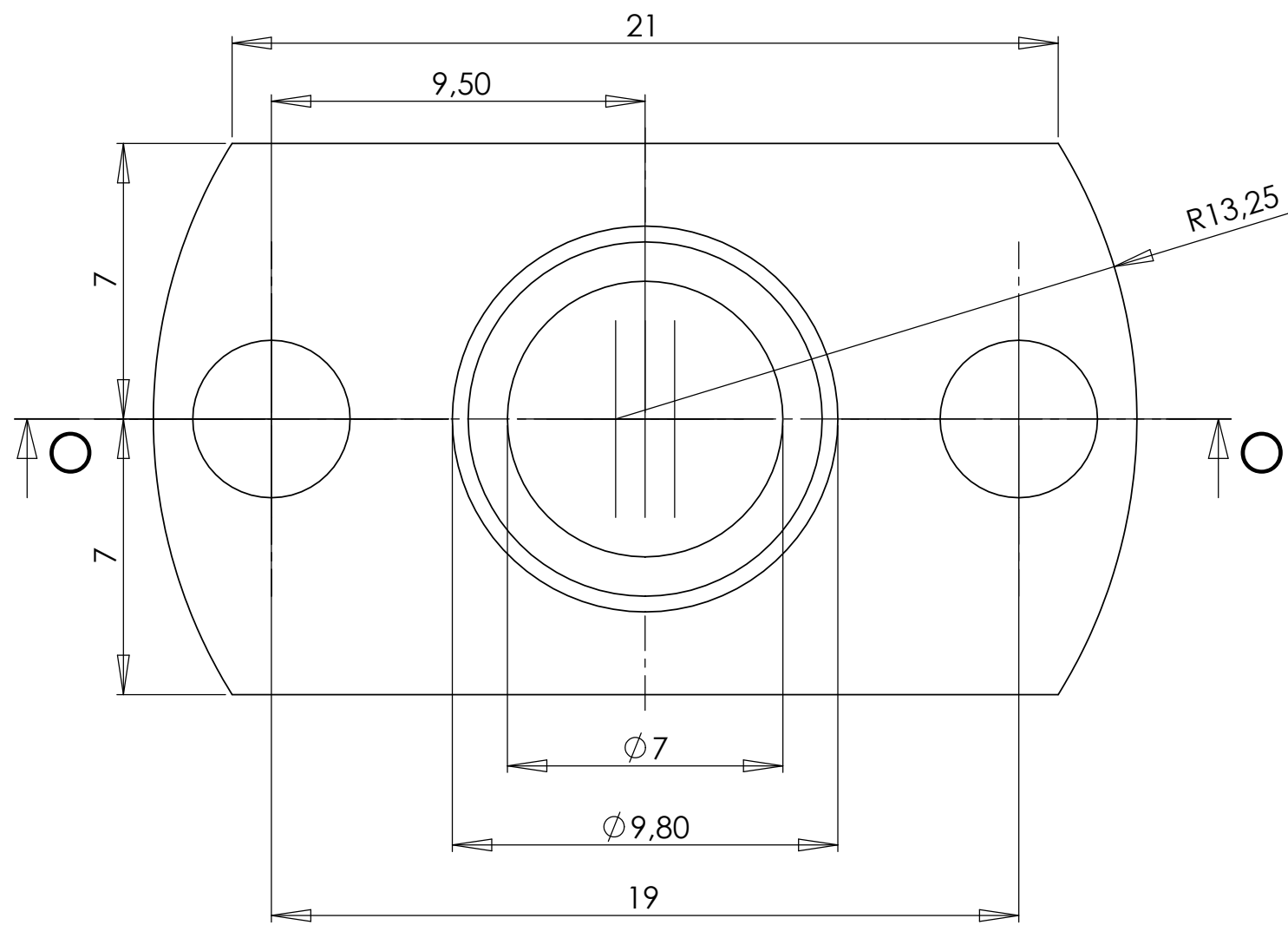
A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 3:1	PLATINA VERTICAL			PROYECTO DE GRADO
ACERO A-36				LAMINA 16 DE 20



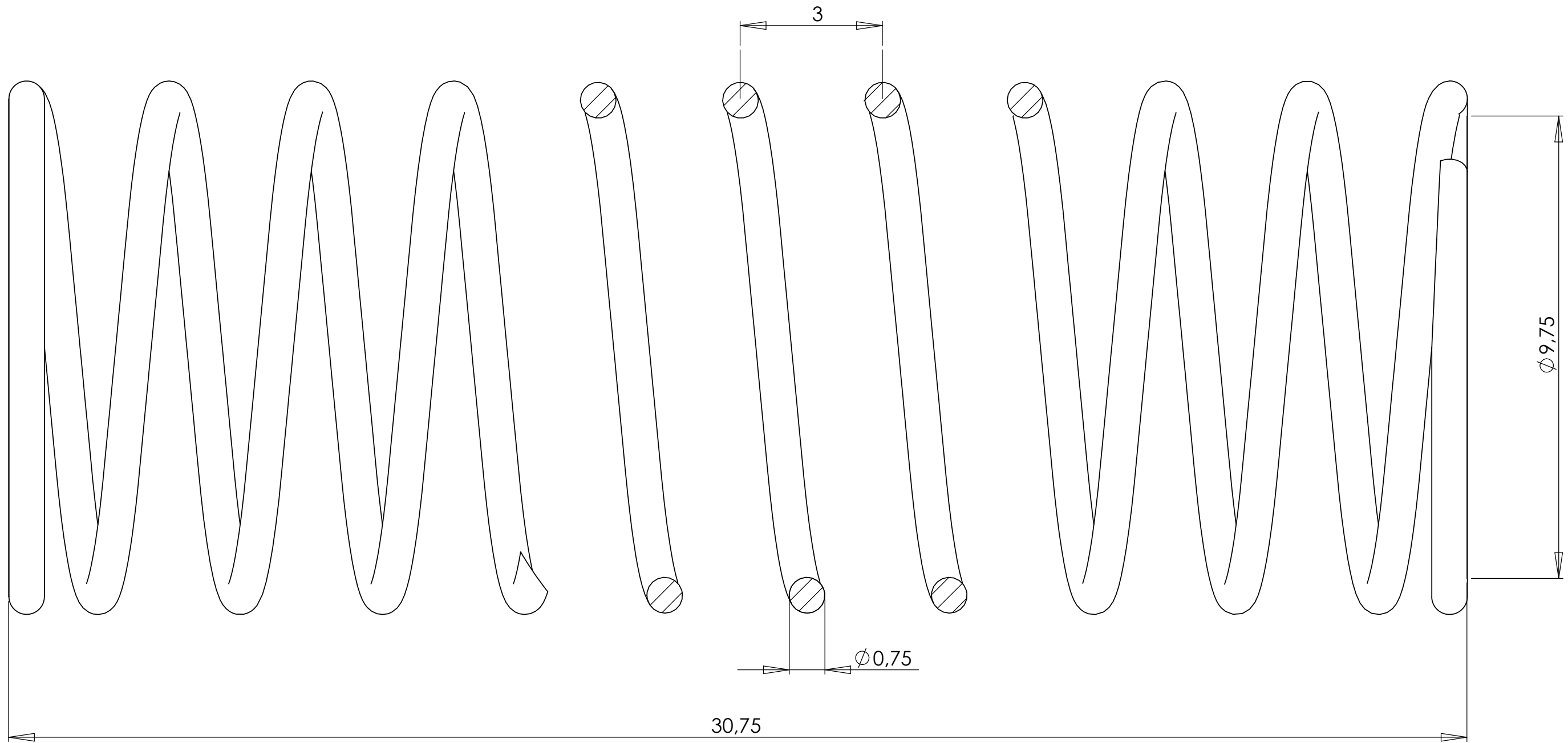
RÓTULO		TAMAÑO		CANTIDAD
A		REFRENTADO M4		2
B		REFRENTADO M6		1
A3	FECHA	NOMBRE		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC:	PLATINA HORIZONTAL SUPERIOR			ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
2:1				PROYECTO DE GRADO
ACERO A-36				LAMINA 17 DE 20



A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 2:1	PLATINA HORIZONTAL INFERIOR			PROYECTO DE GRADO
ACERO A-36				LAMINA 18 DE 20



A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO	ESC: 6:1	PROYECTO DE GRADO
ALUMINIO				GUIA RESORTE



A3	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENERIA MECANICA
DIBUJO	02-11-07	1992837-2000331		
COMPROBO				
NORMA		ISO		
ESC: 11:1	RESORTE			PROYECTO DE GRADO
ACERO				LAMINA 20 DE 20