

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL
DE LAS CONDICIONES DE AMARRE DE
PIEZA POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO
CILÍNDRICO***

Alumno/Alumna: Casas, Gayubo, Josu

Director/Directora: Sánchez, Galíndez, José Antonio

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 26, 06, 2019

Castellano

El presente proyecto pertenece al ámbito de rectificado, más concretamente al rectificado cilíndrico. El objetivo del mismo es estudiar la posibilidad de rectificar entre puntos sin utilizar perro de arrastre y encontrar o identificar las limitaciones del proceso a partir de las cuales se crea la necesidad de utilizar el perro de arrastre, el cual presenta ciertos inconvenientes que se esperan eliminar. Se escoge como parámetro limitante el caudal específico de viruta Q'_w , puesto que es un buen indicador de la agresividad del proceso.

De esta forma, se realiza, en primer lugar, un estudio teórico del par de arrastre que se transmite por el punto a la pieza a través del contacto entre ambos. Para ello, se realiza un análisis del apoyo a través del cual se obtiene la geometría de contacto. A continuación, se calcula el caudal específico de viruta máximo que genere en la pieza un par resistente igual, pero de sentido contrario, al par de arrastre calculado, provocando el deslizamiento de la misma sobre el punto, perdiendo así el control de su velocidad de giro.

Por último, se realizan ensayos experimentales, bajo condiciones de corte cercanas a las calculadas teóricamente como limitantes. De esta forma, se espera, por un lado, encontrar el valor máximo real del caudal específico de viruta hasta el que se puede rectificar sin arrastrador, y por otro, contrastar los cálculos teóricos realizados.

Euskera

Lan hau artezketari buruzkoa da, artezketa zilindrikoari buruzkoa, hain zuzen ere. Honen helburua, pieza puntuaren artean muturretatik lotua artezketzea da, arrasteko txakurra erabili gabe. Horrela, arrasteko txakurra beharrezkoa egiten duten prozesuaren limitazioak aurkitzea espero da, txakurrak zenbait eragozpen dituelako. Aipatutako limitazioak ezartzeko, txirbil jario espezifikoa Q'_w erabiliko da, prozesuaren agresibitatearen adierazle ona baita.

Lehenik eta behin, puntuaren eta piezaren arteko kontaktuan sortutako arrasteko pareak kalkulatu behar duen azterketa teoriko bat egiten da. Horretarako, piezaren euskarrien analisi bat egin behar da, piezaren eta puntuaren arteko kontaktuaren geometria erreala ezagutzeko. Ondoren, aztertutako prozesuarentzat kalkulatu behar duen arrasteko parearen gainditzen duen Q'_w parametroaren gehieneko balorea kalkulatu behar da. Momentu honetan, piezak puntuaren gainazalean irrist egingo du, piezaren abiadura linealaren kontrola galtzen.

Azkenik, teorikoki kalkulatu behar duen balioaren inguruan, artezketa zilindriko entseguen ebaketa baldintzak ezarriko dira. Horrela, alde batetik, piezak irrist egingo barik Q'_w parametroaren gehieneko balioa aurkitzea espero da eta, bestetik, teorikoki kalkulatu behar duen arrasteko parearen egiaztatzea.

English

The present project belongs to the field of grinding, more specifically to cylindrical grinding. Its main objective is studying the possibility of grinding without using a lathe dog, which has certain drawbacks. This way, it is expected to identify the process limitations where the use of the lathe dog is necessary. Specific material-removal rate Q'_w will be used as the representative parameter for these limits, since it is a good indicator of the aggressiveness of the process.

In the first place, a theoretical study of the torque transmitted in the contact between the center and the workpiece is carried out. In order to achieve this, the geometry of the contact will be analysed. Later, the maximum specific material-removal rate which generates the limitant torque previously mentioned, will be calculated. At this point, the workpiece slides instead of rotating simultaneously with the center.

Finally, experimental tests will be carried out in a cylindrical grinder. The conditions of the tests, will be similar to the theoretically calculated as limitants. So as to, find the real maximum value of the specific material-removal rate in different processes, and to compare the results with the theoretical calculus done.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL
DE LAS CONDICIONES DE AMARRE DE
PIEZA POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO
CILÍNDRICO***

DOCUMENTO I - ÍNDICE

Alumno/Alumna: Casas, Gayubo, Josu

Director/Directora: Sánchez, Galíndez, José Antonio

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 26, 06, 2019

ÍNDICE

1. CONTEXTO	11
2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	14
3. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO	15
4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	16
4.1. EL PROCESO DE RECTIFICADO	16
4.1.1. Rectificado plano	17
4.1.2. Rectificado cilíndrico	17
4.2. MUELAS ABRASIVAS	22
4.3. DESGASTE DE MUELAS ABRASIVAS	23
4.4. PROCESO DE DIAMANTADO	24
4.5. PARÁMETROS DEL PROCESO	25
5. PROBLEMÁTICA DEL TRABAJO	28
6. SOLUCIÓN PROPUESTA	29
7. DESCRIPCIÓN DE FASES, TAREAS, PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS	30
7.1. FASES, TAREAS Y PROCEDIMIENTOS	30
7.2. EQUIPOS	33
8. DIAGRAMA DE GANTT	39
9. DESARROLLO DEL TRABAJO	40
9.1. ANÁLISIS DEL APOYO: MEDICIÓN DEL ÁREA DE CONTACTO REAL 40	
9.1.1. Fujifilm Preescale	40
9.1.2. Medición por puntos	43
9.2. MODELOS MECÁNICOS PARA EL CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE	45
9.2.1. Diferencias entre modelos	50
9.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE	51
9.4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL CAUDAL ESPECÍFICO DE VIRUTA LÍMITE	54
9.5. ENSAYOS EXPERIMENTALES EN MÁQUINA	56
9.5.1. Ensayos “Límite”	56
9.5.2. Ensayos “Arrastre”	58
10. CÁLCULOS	59
10.1. CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE	59
10.2. CÁLCULO DEL CAUDAL ESPECÍFICO DE VIRUTA Q'_w MÁXIMO PERMISIBLE	60
11. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	62

11.1. ENSAYOS “LÍMITE”	62
11.2. ENSAYOS “ARRASTRE”	65
11.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	65
12. ASPECTOS ECONÓMICOS	71
12.1. DESGLOSE DETALLADO	71
12.1.1. Recursos humanos	71
12.1.2. Recursos materiales fungibles	72
12.1.3. Recursos materiales amortizables	72
12.1.4. Presupuesto total de ejecución del proyecto	73
13. CONCLUSIONES	74
13.1. ANÁLISIS DEL APOYO	74
13.2. PARÁMETROS LÍMITES: $Q'w_{max}$ Y qs	74
13.3. PAR MÁXIMO PERMISIBLE EJERCIDO POR EL EJE C: Tc	74
14. BIBLIOGRAFÍA	76

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL
DE LAS CONDICIONES DE AMARRE DE
PIEZA POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO
CILÍNDRICO***

DOCUMENTO II - LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS

Alumno/Alumna: Casas, Gayubo, Josu

Director/Directora: Sánchez, Galíndez, José Antonio

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 26, 06, 2019

FIGURAS

Figura 1. Instalaciones de IDEKO en Elgoibar (7)	11
Figura 2. Organización de IDEKO (7)	12
Figura 3. Digital Grinding Innovation Hub (7)	13
Figura 4. Esquema de rectificado plano (9)	16
Figura 5. Rectificado plano	17
Figura 6. Rectificado cilíndrico (10)	18
Figura 7. Amarre entre puntos en rectificado cilíndrico.....	18
Figura 8. Punto	19
Figura 9. Contrapunto	19
Figura 10. Perro de arrastre	20
Figura 11. Pieza amarrada por puntos y con perro de arrastre	20
Figura 12. Operación de plonge en rectificado cilíndrico exterior (9)	21
Figura 13. Operación de vaivén en rectificado cilíndrico exterior (9)	22
Figura 14. Rectificado cilíndrico exterior	22
Figura 15. Muelas abrasivas.....	23
Figura 16. Mecanismos de desgaste de la muela (9).....	24
Figura 17. Arco de contacto en función del ratio de velocidades.....	27
Figura 18. Papel de presión "Fujifilm Preescale"	33
Figura 19. Rectificadora cilíndrica LG 600 B6.....	34
Figura 20. Muela convencional utilizada en los ensayos.	35
Figura 21. Máquina de medición por coordenadas	36
Figura 22. Torno convencional.....	36
Figura 23. Brocas de centrar de metal duro.....	37
Figura 24. Probeta para ensayos de acero templado f-522.....	37
Figura 25. Calibre pie de rey digital.....	37
Figura 26. Microscopio digital Dino-Lite.	38
Figura 27. Papel revelador de presión colocado sobre la superficie del punto.	41
Figura 28. Contacto entre la pieza 1 y el punto.....	42
Figura 29. Contacto entre la pieza 1 y el contrapunto.....	42
Figura 30. Contacto entre la pieza 2 y el punto.....	42
Figura 31. Contacto entre la pieza 2 y el contrapunto.....	43
Figura 32. Geometría del agujero del punto de la pieza 1 en dos cotas separadas 1,32mm.....	44
Figura 33. Geometría del agujero del contrapunto de la pieza 1 en dos cotas separadas 1,32mm	44
Figura 34. Geometría del agujero del punto de la pieza 2 en dos cotas separadas 1,32mm.....	44
Figura 35. Geometría del agujero del contrapunto de la pieza 2 en dos cotas separadas 1,32mm	45
Figura 36. Superficie de contacto del modelo 1.....	46
Figura 37. Análisis mecánico.	46
Figura 38. Diferencial de superficie de contacto.....	48
Figura 39. Relación trigonométrica entre r y l.	48
Figura 40. Superficie de contacto del modelo 2.....	49
Figura 41. Medición de la superficie de contacto entre la pieza 1 y el punto.	52
Figura 42. Medición de la superficie de contacto entre la pieza 2 y el punto.	52
Figura 43. Relaciones entre l_0 , l_1 , r_0 y r_1	53
Figura 44. Colocación del sensor inductor.....	57

Figura 45. Imagen ampliada de la colocación del sensor inductor.....	57
----------------------------------------------------------------------	----

TABLAS

Tabla 1. Parámetros de rectificado plano	17
Tabla 2. Parámetros de rectificado cilíndrico.....	21
Tabla 3. Tipos de procesos en función de q_s	27
Tabla 4. Energía específica en diferentes procesos	27
Tabla 5. Clasificación de “Fujifilm Preescale” en función de la presión de medida	33
Tabla 6. Características Muela ensayos CBL 80.2IJ8V489	35
Tabla 7. Diagrama de Gantt	39
Tabla 8. Resultados de la medición por puntos.	45
Tabla 9. Valores de la fuerza axial de compresión de la máquina LG 600 B6.	51
Tabla 10. Resultados de la medición del análisis del apoyo.	53
Tabla 11. Cálculo teórico del par de arrastre transmitido por el punto a las dos piezas para las diferentes presiones del contrapunto.	53
Tabla 12. Parámetros fijados para los ensayos.....	55
Tabla 13. Valores de la velocidad de avance límite para diferentes valores de fuerza de compresión aplicada.....	56
Tabla 14. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 20 kg/cm ²	62
Tabla 15. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 15 kg/cm ²	63
Tabla 16. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 10 kg/cm ²	63
Tabla 17 . Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 5 kg/cm ²	63
Tabla 18. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 20 kg/cm ²	64
Tabla 19. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 15 kg/cm ²	64
Tabla 20. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 10 kg/cm ²	64
Tabla 21. Resultados de los ensayos “arrastre”.....	65
Tabla 22. Comparativa entre el par de arrastre calculado y el par resistente medido en los ensayos.	65
Tabla 23. Parámetros límites del proceso.....	66
Tabla 24. Comparativa de valores del par resistente medido en los ensayos “arrastre” con el par resistente medido en los ensayos “límite”.....	70
Tabla 25. Coeficiente de seguridad para relacionar los ensayos “límite” con los ensayos “arrastre”	70
Tabla 26. Presupuesto de los recursos humanos	71
Tabla 27. Presupuesto de los recursos materiales fungibles	72
Tabla 28. Presupuesto de los recursos materiales amortizables	72

GRÁFICOS

Gráfico 1. Consumo de potencia en la pieza 1 a $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'w = 4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$	67
Gráfico 2. Consumo de potencia en la pieza 2 a $P = 15 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'w = 5,2 \text{ mm}^2/\text{s}$	68
Gráfico 3. Par ejercido por el eje C en la pieza 1 a $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'w = 4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$	69
Gráfico 4. Par ejercido por el eje C en la pieza 2 a $P = 15 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'w = 5,2 \text{ mm}^2/\text{s}$	69

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL
DE LAS CONDICIONES DE AMARRE DE
PIEZA POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO
CILÍNDRICO***

DOCUMENTO III - MEMORIA

Alumno/Alumna: Casas, Gayubo, Josu

Director/Directora: Sánchez, Galíndez, José Antonio

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 26, 06, 2019

1. CONTEXTO

Este trabajo se realiza en cooperación educativa junto con la empresa IK4-IDEKO S. Coop., Centro Tecnológico especializado desde sus orígenes en los sectores de Máquina Herramienta y Tecnologías de Fabricación y Producción industrial, situado en el polígono industrial Arriaga de Elgoibar, Gipuzkoa (Figura 1).



Figura 1. Instalaciones de IDEKO en Elgoibar (7)

IDEKO nace y se construye en 1986, como perteneciente a DANOBATGROUP, grupo nacido en 1983, referente en soluciones de alto valor añadido en el ámbito de mecanizado, formado en aquel entonces por DANOBAT, GOITI, SORALUCE y DOIKI. 9 años después, en 1991, DANOBATGROUP se incorpora a la CORPORACIÓN MONDRAGÓN, corporación socioeconómica de carácter empresarial que, integrada por cooperativas autónomas e independientes con hondas raíces culturales en el País Vasco, busca generar riqueza en la sociedad mediante el desarrollo empresarial y la creación de empleo.

Con el objetivo de alcanzar mayores niveles de excelencia científico-tecnológica, IDEKO establece colaboraciones estratégicas con otras empresas a través de IK4 Research Alliance (8), Alianza de Centros Tecnológicos privados, construida en 2005, año a partir del cual la empresa cambia su nombre a IK4-IDEKO, a través de la cual sus integrantes combinan capacidades a través de una estrategia común, contribuyendo así al desarrollo y mejora de la competitividad de los mismos.

Los Centros Tecnológicos Socios pertenecientes a la alianza IK4 con los que IDEKO comparte su actividad son AZTERLAN, CEIT, GAIKER, IKERLAN, LORTEK y TEKNIKER. Estos centros socios se estructuran jerárquicamente en unidades en función de la especialización tecnológica abarcando hasta 8 unidades científico- tecnológicas, que son: Biotecnología, micro y Nano tecnologías, medio Ambiente, Energía, Gestión y Producción industrial, Mecatrónica, Materiales y procesos y Tecnologías de la Información y Comunicación.

La actividad de IK4-IDEKO abarca la investigación de tecnologías de fabricación y producción industrial, la identificación y análisis de oportunidades, el diseño y desarrollo

tecnológico de productos, las líneas de negocio y procesos productivos y la resolución de problemas, prestando servicios técnicos como consultoría técnica o servicios basados en equipamiento.

De esta forma, el objetivo principal de IK4-IDEKO es impulsar la innovación tecnológica de sus clientes, ofreciendo soluciones avanzadas para mejorar la capacidad de producción y competitividad en sectores como máquina herramienta, ferrocarril, aeronáutica, bienes de equipo, automoción y energía, entre otros.

Para cumplir con este objetivo, la empresa se divide en 3 departamentos (Figura 2), que son los siguientes: Departamento de investigación y desarrollo, departamento de innovación y explotación tecnológica y el departamento de organización y desarrollo.



Figura 2. Organización de IDEKO (7)

El departamento de investigación y desarrollo busca el desarrollo de la estrategia de especialización en tecnología de fabricación y producción industrial. Para ello, cuenta con 4 grupos de investigación, que son; Dinámica y Control, Procesos de Fabricación, TICs y Automatización y Diseño e Ingeniería de Precisión, que aportan el equilibrio necesario para transferir a la empresa los resultados de la investigación desde la generación del conocimiento.

El departamento de innovación y explotación tecnológica realiza análisis de las necesidades actuales y futuras de sus clientes, identificando oportunidades y transformando en valor y diferencia competitiva los resultados de su actividad investigadora.

Por último, está el departamento de organización y desarrollo, que abarca áreas como la gestión de los principales activos de la empresa, la captación y generación de talento, el desarrollo profesional, planes de formación y el soporte administrativo.

En cuanto a las instalaciones de IK4-IDEKO, que dan soporte a la actividad investigadora de la misma, cuenta con un amplio abanico de laboratorios, en función de su actividad investigadora, entre los que destacan dos de ultraprecisión, uno de sistemas de medida, uno de tecnología láser, uno para el estudio de materiales composite, uno de CNC y automatización avanzada y por último, un nuevo espacio dirigido al desarrollo de tecnologías digitales y soluciones de rectificado de elevada precisión, que es el “*Digital grinding Innovation Hub (DGIH)*” (Figura 3) que tiene como objetivo la experimentación, demostración y validación de proyectos de investigación enfocados a

la digitalización industrial y a la tecnología de rectificado, tal y como es el caso del presente proyecto.



Figura 3. Digital Grinding Innovation Hub (7)

El presente proyecto se realiza tanto en las instalaciones de Escuela de Ingeniería de Bilbao, centro perteneciente a la Universidad del País Vasco, como en el Digital Grinding Innovation Hub de IDEKO, donde se realizan los ensayos experimentales en la Rectificadora Cilíndrica LG 600 B6.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El **objetivo principal** del proyecto es estudiar la posibilidad de rectificar entre puntos sin utilizar perro de arrastre y encontrar o identificar las limitaciones del proceso a partir de las cuales se crea la necesidad de utilizar el perro de arrastre.

Para cumplir el objetivo principal, se establecen los siguientes **objetivos secundarios**:

- Estudiar y modelizar el apoyo entre puntos del rectificado cilíndrico.
- Desarrollar un modelo mecánico en el que se defina el par de arrastre que se transmite, por rozamiento, por el punto a la pieza, y que dicho par quede definido con una sencilla fórmula matemática que integre todos los parámetros que intervengan en el cálculo de dicho par.
- Realizar ensayos experimentales en la rectificadora para contrastar los cálculos teóricos realizados y encontrar los límites reales del proceso previamente mencionados.
- Analizar los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales y redactar unas conclusiones a partir de los mismos, estableciendo las limitaciones a la hora de definir un proceso de rectificado cilíndrico sin perro de arrastre.

3. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

El beneficio principal de trabajo es la posibilidad de ofertar máquinas rectificadoras que satisfagan las exigencias del cliente.

Cuando un cliente pide una oferta de cara a comprar una rectificadora, tiene unas exigencias de tiempo y de calidad de máquina. Es decir, la cantidad de tiempo necesaria para la producción de piezas y la calidad de las mismas. El hecho de eliminar el perro de arrastre del proceso de rectificado, supone, tanto una reducción significativa de este tiempo de producción, como una mejora de la calidad de las piezas producidas.

- En cuanto al tiempo, se reduce el tiempo de espera en el cambio de piezas, ya que el uso del perro de arrastre supone el hecho de tener que poner y quitar el perro a cada pieza que se quiera rectificar. De esta forma, se optimiza el proceso de producción.
- En cuanto a la calidad de la pieza, la superficie en la que el perro de arrastre agarra la pieza puede ser dañada superficialmente por la acción del perro, empeorando el acabado superficial de la pieza. Eliminando el perro de arrastre del proceso se eliminaría este problema.

Por otro lado, existen otra serie de beneficios que se obtienen por el hecho de eliminar el perro de arrastre del proceso:

- Liberar toda la superficie perimetral de la pieza, pudiendo así rectificar la misma en todo su conjunto de una sola tirada.

4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

En el siguiente apartado se explicará el proceso de rectificado atendiendo a los aspectos básicos que pueden suponer el núcleo central del proceso y centrará la atención en los amarres de las piezas, tema de mayor interés para la comprensión del proyecto.

4.1. EL PROCESO DE RECTIFICADO

El rectificado es un proceso de mecanizado, al igual que el torneado y el fresado. La principal diferencia es que mientras en estos dos últimos procesos de mecanizado el material de la pieza es arrancado o cortado por una herramienta de corte, generalmente formada por uno o varios filos o cuchillas, en el rectificado el arranque de material se da por abrasión. El material de la pieza es eliminado en pequeñas cantidades mediante desgaste, desprendiendo partículas diminutas, en vez de viruta, que generalmente se presenta en un estado incandescente, debido a las altas temperaturas que se alcanzan en el contacto entre la pieza y la herramienta de corte llamada muela, nomenclatura que se utilizará de ahora en adelante. De esta forma, la muela no arranca material de la pieza, sino que “raya” la superficie de la misma, produciendo, mediante fricción, la abrasión del material (Figura 4).

La precisión y el acabado superficial que se pueden conseguir con este proceso de mecanizado son mucho mayores que en el torneado y el fresado y es por eso que el rectificado es, en la mayoría de los casos, un proceso de acabado que se sitúa en las últimas etapas del proceso de conformado y que dotan a la pieza de un alto valor añadido. Sin embargo, los tiempos productivos son muy prolongados y es por eso que, entre muchas otras razones, es un proceso de gran coste.

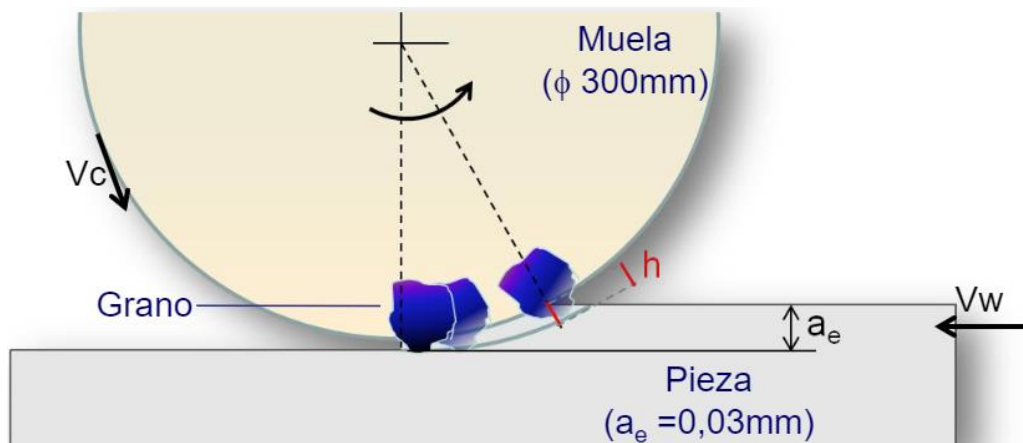


Figura 4. Esquema de rectificado plano (9)

En el rectificado se distinguen, principalmente, 2 tipos de procesos, en función de la geometría de la pieza a rectificar y de los utillajes de sujeción de piezas utilizados en cada proceso. A continuación, se explicarán detalladamente ambos procesos, haciendo más hincapié en el rectificado cilíndrico, puesto que va a ser el proceso a estudiar en el proyecto.

4.1.1. Rectificado plano

En este proceso se rectifican piezas de superficies planas (Figura 5).

Para amarrar las piezas a la máquina, éstas suelen contar con una mesa magnetizable ya que la mayoría de las piezas que se rectifican son magnéticas (aceros y materiales ferríticos). En caso de querer rectificar una pieza no magnética, se dispone de una mordaza magnética, la cual se imanta a la mesa y amarra la pieza, de forma que la pieza fija a la mesa.

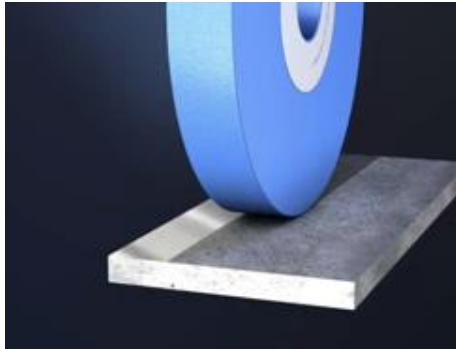


Figura 5. Rectificado plano

En la siguiente tabla se muestran los parámetros del rectificado plano:

Tabla 1. Parámetros de rectificado plano

Parámetro	Descripción	Unidades
a_e	Profundidad de pasada	mm, μm
b_w	Anchura de pasada	mm
v_s	Velocidad de la muela o de corte	m/s
v_w	Velocidad de avance	mm/min

4.1.2. Rectificado cilíndrico

En este proceso se rectifican piezas cilíndricas.

El sistema de amarre de las piezas en rectificado cilíndrico es más complejo que el del rectificado plano. Las piezas cilíndricas se amarran a la máquina mediante el sistema punto-contrapunto (Figura 6). Una vez amarrada la pieza, a ésta se le transmite el giro a través de un útil llamado perro de arrastre.

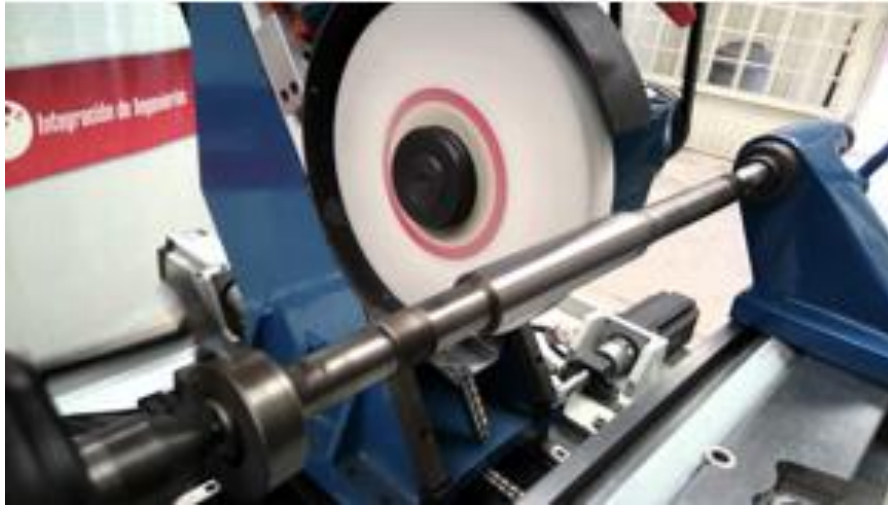


Figura 6. Rectificado cilíndrico (10)

➤ Sistema punto-contrapunto

La pieza cilíndrica es amarrada por dos conos, denominados punto y contrapunto (Figura 7). El punto y el contrapunto son introducidos longitudinalmente en dos agujeros cónicos que tiene la pieza en las dos caras planas de sus extremos y que, aplicando una presión sujetan la pieza, siendo de esta forma los apoyos de la misma. Es importante que los ejes de los dos conos estén perfectamente alineados y sean concéntricos con una tolerancia máxima de 10 μm para que no aparezcan vibraciones a causa del giro de la pieza. Las piezas de grandes longitudes deben apoyarse sobre lunetas para evitar que flexionen a causa de la presión ejercida por la muela.

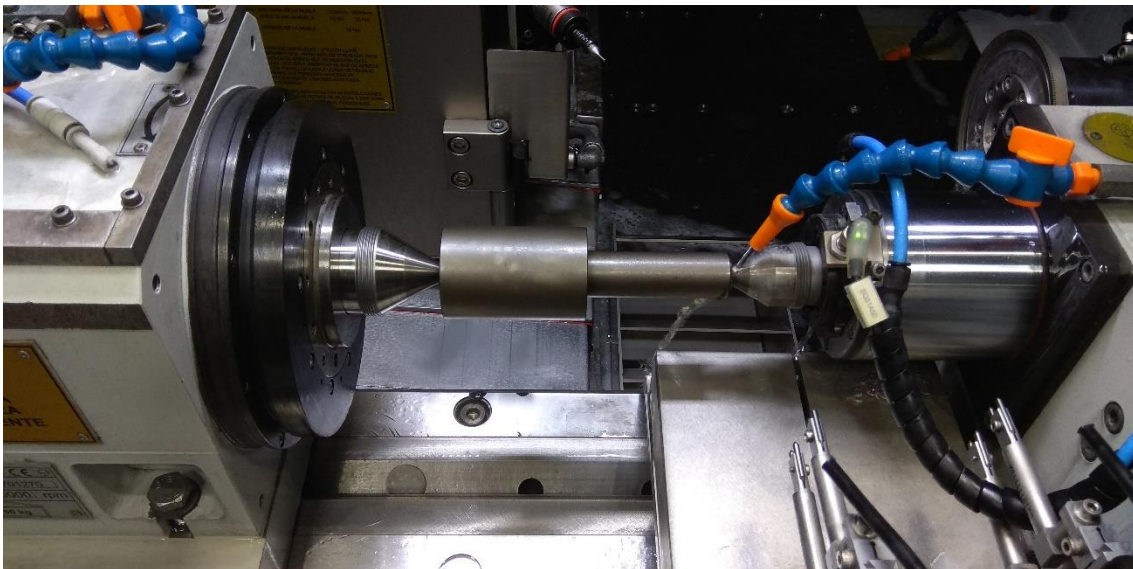


Figura 7. Amarre entre puntos en rectificado cilíndrico

El punto (Figura 8) es el cono que no se desplaza longitudinalmente y que tiene el accionamiento de un motor eléctrico que le trasmite el giro y le hace rotar.

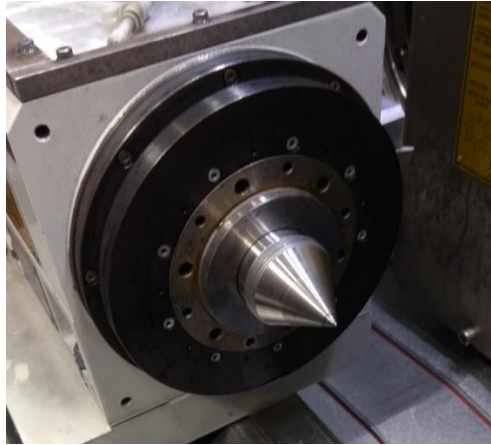


Figura 8. Punto

El contrapunto (Figura 9) sin embargo es desplazable longitudinalmente, de forma que se puede ajustar en función de la longitud de la pieza a rectificar.

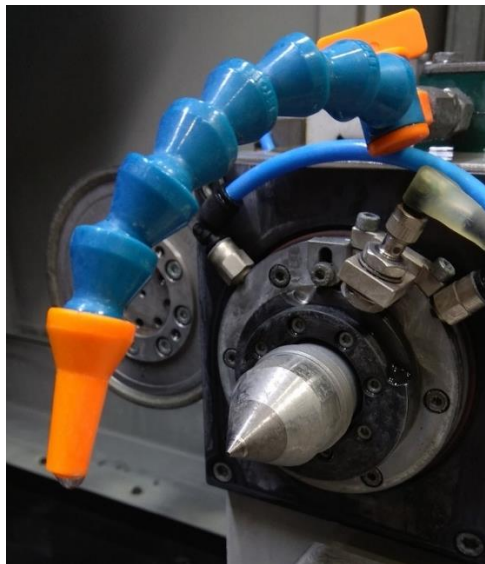


Figura 9. Contrapunto

En función del accionamiento del contrapunto, se distinguen 3 tipos de sistema punto-contrapunto:

1. Contrapunto fijo: El contrapunto es fijo, es decir, no tiene capacidad de giro. En este caso, la superficie del agujero cónico de la pieza desliza sobre la superficie del contrapunto.
2. Contrapunto giratorio libre: El contrapunto tiene capacidad de giro libre, puesto que dispone de un rodamiento. En este caso, el contrapunto gira solidario con la pieza debido al rozamiento existente entre ambas.
3. Contrapunto giratorio con acción motora: En este caso, el contrapunto tiene el accionamiento de un motor eléctrico, igual que el punto. De esta forma, se multiplica por dos el par de arrastre capaz de transmitir a la pieza.

➤ **Perro de arrastre**

El perro de arrastre o arrastrador (Figura 10), es un útil encargado de transmitir el giro del motor a la pieza, haciendo que el punto y la pieza giren a la misma velocidad.



Figura 10. Perro de arrastre

El perro “muerde” la pieza en la superficie externa más próxima al punto y, mediante un perno que va roscado a un disco que gira a la velocidad del motor y del punto, transmite este giro al perro de arrastre y, por consiguiente, a la pieza. En la siguiente imagen se muestra el proceso.

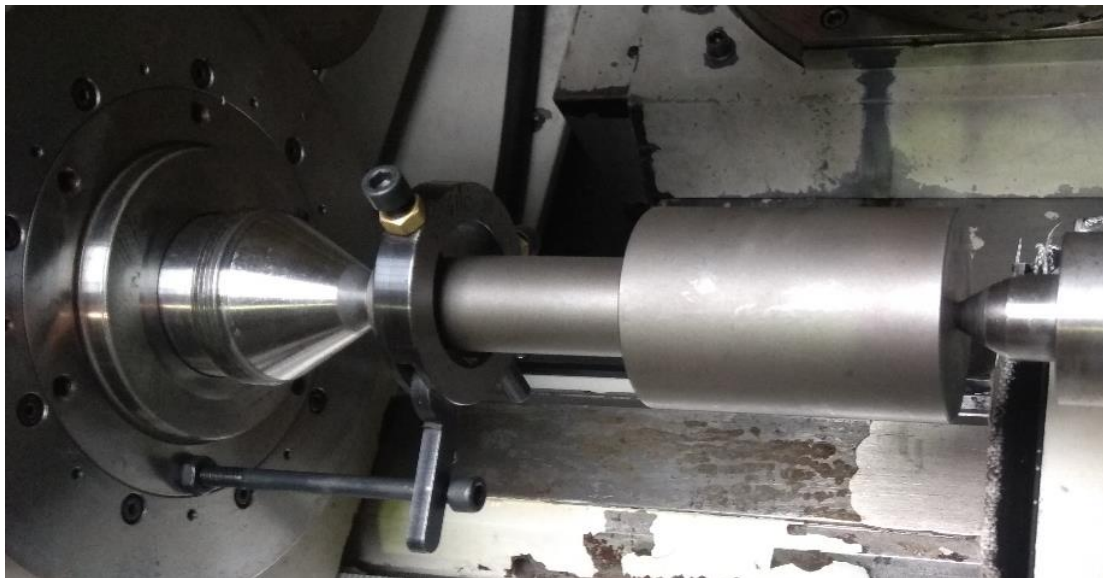


Figura 11. Pieza amarrada por puntos y con perro de arrastre

Sin embargo, la utilización de este útil, tiene varias limitaciones. Por un lado, no se puede rectificar toda la cara externa de la pieza de una sola pasada, porque el perro de arrastre lo impide, al estar éste, amarrado a esta cara, obstaculizando así el recorrido de la muela. Por otro lado, la superficie en la que el perro de arrastre “muerde” la pieza, queda dañada y con un bajo acabado superficial, haciendo necesaria una segunda operación de corte a la pieza para eliminar la zona dañada. Otra limitación que crea este método de amarre son mayores tiempos de espera entre cambio de piezas en producciones de grandes tiradas, en las que se derrocha tiempo quitando y poniendo el perro de arrastre a las piezas, reduciendo la eficiencia del proceso.

Sin embargo, el sistema de amarre punto-contrapunto, también es capaz de transmitir un pequeño par de arrastre a la pieza, por rozamiento, y se quiere estudiar la posibilidad de transmitir el giro a la pieza únicamente mediante este sistema y prescindir así del perro de arrastre, siempre y cuando sea posible.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros del rectificado cilíndrico:

Tabla 2. Parámetros de rectificado cilíndrico

Parámetro	Descripción	Unidades
a_e	Profundidad de pasada	μm
b_w	Anchura de pasada	mm
v_s	Velocidad de corte	m/s
v_w	Velocidad periférica de la pieza	m/min
v_f	Velocidad de avance o penetración	mm/min

4.1.2.1. Principales procesos de rectificado cilíndrico

Los principales procesos del rectificado cilíndrico son el rectificado cilíndrico exterior y el interior, existiendo más procesos que no entran dentro del alcance de este proyecto.

- **Rectificado cilíndrico exterior:** Se rectifica la cara externa de la pieza cilíndrica. La pieza está amarrada mediante el sistema punto-contrapunto y su eje es paralelo al de la muela. Las operaciones más comunes en el rectificado exterior son el plongeé y el vaivén.
 - **Penetración radial o Plongeé:** En esta operación la muela no realiza movimiento axial sobre la pieza, es decir, no existe avance lateral. La muela únicamente tiene avance radial, profundizándose así radialmente hacia el centro de la pieza hasta alcanzar el diámetro deseado.

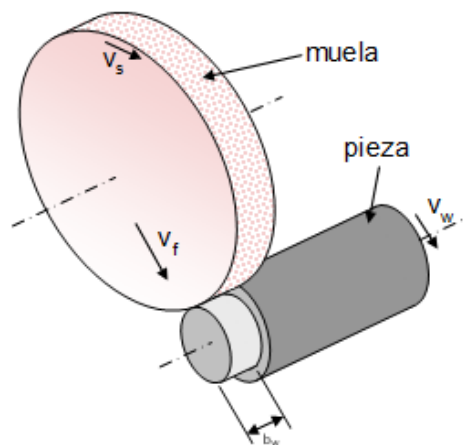


Figura 12. Operación de plongeé en rectificado cilíndrico exterior (9)

- **Vaivén:** La muela realiza un movimiento axial pudiendo rectificar toda la superficie de la pieza de una tirada. De tal forma, en este proceso la muela no tiene avance radial y el movimiento axial de la muela sobre la pieza se consigue mediante un avance lateral de la muela.

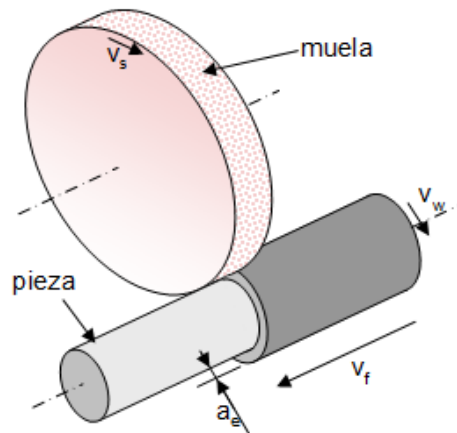


Figura 13. Operación de vaivén en rectificado cilíndrico exterior (9)

- **Rectificado cilíndrico interior:** Se rectifica la cara interior de la pieza. El diámetro de la muela es inferior al de la pieza, para poder insertarse en el interior de esta. La pieza y la muela comparten el mismo eje, mediante el cual la muela se introduce en la pieza.

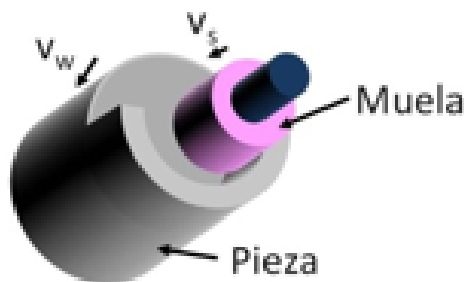


Figura 14. Rectificado cilíndrico interior

Todos los ensayos experimentales que se llevarán a cabo para la realización del proyecto serán de rectificado cilíndrico exterior y se realizarán en su mayoría operaciones de Plongee, puesto que es la operación de la que más datos significativos se obtendrán y de manera más eficiente, ya que tiene menor coste de tiempo.

4.2. MUELAS ABRASIVAS

Las muelas abrasivas (Figura 15) son, como ya se ha explicado anteriormente, la herramienta de corte que se utiliza en el proceso de rectificado. Las muelas abrasivas están compuestas por dos elementos, los granos abrasivos y el material de unión.

➤ Granos abrasivos

Los granos abrasivos son el medio de corte de la muela. Se trata de micropartículas de extrema dureza que mediante rozamiento se encargan de llevar a cabo el proceso de abrasión modificando la forma de la pieza con un excelente acabado superficial.

Los materiales de los granos abrasivos se suelen clasificar en dos categorías, en función de su dureza: convencionales y superabrasivos. Como materiales convencionales se

utilizan, mayoritariamente, el óxido de aluminio o corindón (Al_2O_3) y el carburo de silicio (SiC) y las muelas de estos materiales alcanzan como máximo 60 m/s. Como superabrasivos se utilizan el nitruro de boro cúbico (CBN) y el diamante y pueden llegar a alcanzar hasta los 280 m/s.

➤ Material de unión o aglomerante

El material de unión es el encargado de unir los granos abrasivos y se le denomina como aglomerante o aglutinante. Debe ofrecer rigidez, puesto que es el encargado de mantener unidos a los granos, y debe ser capaz de liberarlos cuando éstos han perdido el filo de corte. Además, debe transmitir la fuerza entre el grano y el husillo que aguanta la muela. Por otro lado, debe ser capaz de disipar el calor generado en el proceso. Entre los tipos de aglomerante más comunes se encuentran los metálicos (M), los vítreos (V) y los resinosos (B).

En función de estos parámetros existe una gran variedad de muelas y una adecuada elección de la misma será fundamental para llevar a cabo el proceso de manera eficiente.

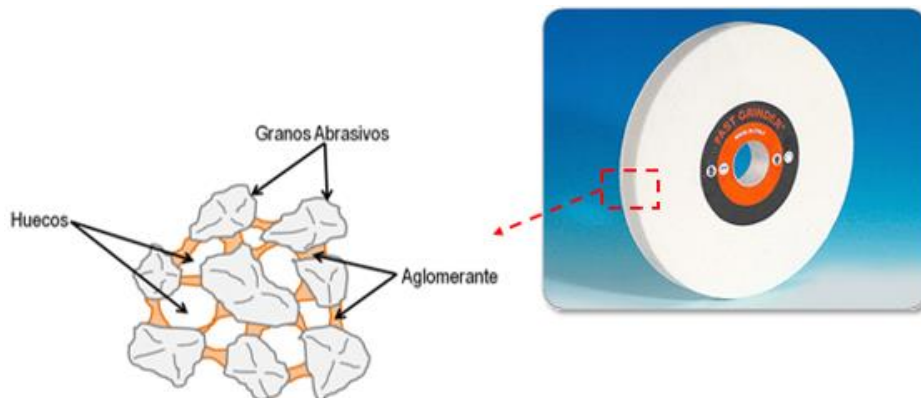


Figura 15. Muelas abrasivas

4.3. DESGASTE DE MUELAS ABRASIVAS

A medida que la muela trabaja, abrasando el material de la pieza a rectificar, se desgasta, debido a las grandes fuerzas y altas temperaturas existentes en el contacto muela-pieza.

Son varias las razones por las que la muela sufre desgaste:

- Pérdida de filo de corte del grano
- Fractura o rotura del grano
- Rotura del aglomerante
- Embotamiento de la muela: La viruta, al ser de un tamaño diminuto, se introduce en los poros o huecos existentes entre los granos abrasivos, produciendo el embotamiento de la muela. Por consiguiente, el perfil de la muela queda prácticamente liso, perdiendo así su capacidad de corte y considerando la muela como desgastada.

En la siguiente imagen pueden apreciarse los 4 mecanismos de desgaste anteriormente mencionados:

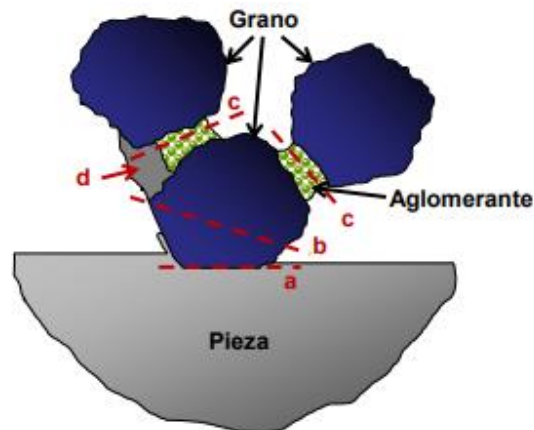


Figura 16. Mecanismos de desgaste de la muela (9)

Usar una muela desgastada tiene unas severas consecuencias en el proceso de rectificado:

- Menos precisión (tolerancias dimensionales) y, por consiguiente, peor acabado superficial.
- Grandes variaciones en la rugosidad de la pieza.
- Posibilidad de quemar la pieza (daño térmico)
- Aparecen vibraciones en el proceso de rectificado.
- Aumenta la potencia consumida y, por consiguiente, aumento de la fuerza de corte.

Cuando esto ocurre, habrá que regenerar la muela. El proceso de regenerado de la muela es el diamantado.

4.4. PROCESO DE DIAMANTADO

El proceso de diamantado es el proceso de regeneración de la muela, que dota a la misma de la capacidad de abrasión perdida y que se debe aplicar una vez que ésta se ha desgastado. En el diamantado se “tornea” la muela con un diamante, y mediante el contacto de la superficie de la muela con el diamante, bajo velocidades de rotación elevadas, se consigue la eliminación del material embotado de la muela y también, crear nuevos filos de corte, al realizar micro-roturas en los granos desgastados, recuperando así la capacidad abrasiva de la muela. Además, mediante el diamantado se consigue también recuperar la geometría de la muela, así como eliminar el salto radial en el montaje.

No obstante, el diamantado no solo se utiliza para regenerar una muela cuando se desgasta, sino que se puede realizar operaciones de diamantado con el fin de perfilar la muela, es decir, dotar a ésta de una nueva geometría. Esto se suele utilizar para el rectificado de superficies complejas, como pueden ser los engranajes.

4.5. PARÁMETROS DEL PROCESO

A continuación, se describirán los diferentes parámetros utilizados en el rectificado, así como se indicará su nomenclatura y unidades de medida.

- **Profundidad de pasada:**
 - Nomenclatura y unidad: a_e [μm]
 - Definición: Posición relativa entre las superficies de la pieza y de la muela.

- **Anchura de pasada:**
 - Nomenclatura y unidad: b_w [mm]
 - Definición: Es la longitud de contacto entre las superficies de contacto de la pieza y la muela.

- **Velocidad de giro de la muela:**
 - Nomenclatura y unidad: n_s [r.p.m.]
 - Definición: Velocidad angular de la muela. En las rectificadoras CNC este valor se reajusta al reducirse el diámetro de la muela para mantener la velocidad de corte constante.

- **Velocidad de giro de la pieza:**
 - Nomenclatura y unidad: n_w [r.p.m.]
 - Definición: Velocidad angular de la pieza en rectificado cilíndrico. Puede ser tanto en el mismo sentido como en el sentido contrario de la velocidad de giro de la muela.

- **Velocidad periférica de la muela:**
 - Nomenclatura y unidad: v_s [mm/min]
 - Definición: Velocidad tangencial de la muela. Es la relación entre la velocidad angular y el ancho de la muela.

$$v_s = \frac{\pi \cdot n_s \cdot \phi_m}{60000} \quad (1)$$

- **Velocidad periférica de la pieza:**
 - Nomenclatura y unidad: v_w [mm/min]
 - Definición: Velocidad tangencial de la pieza. Es la relación entre la velocidad angular y el ancho de la pieza.

$$v_w = \frac{\pi \cdot n_w \cdot \phi_m}{60000} \quad (2)$$

- **Velocidad de corte:**

- Nomenclatura y unidad: v_c [m/s]
- Definición: Es la velocidad relativa de la muela respecto a la pieza en el contacto pieza-muela. En rectificado cilíndrico es la diferencia entre las velocidades tangenciales de la muela y de la pieza, mientras que en rectificado plano se asume como la velocidad periférica de la muela ya que la velocidad de avance de la pieza es despreciable frente a esta.

$$v_c = v_s \pm v_w \quad (3)$$

El signo de v_w dependerá de si el rectificado se realiza en concordancia o en oposición.

- **Velocidad de avance en rectificado plano:**

- Nomenclatura y unidad: v_w [mm/min]
- Definición: Velocidad con la que se desplaza el carro de la rectificadora, dando movimiento a la pieza.

- **Velocidad de avance en rectificado cilíndrico:**

- Nomenclatura y unidad: v_f [mm/min]
- Definición: Velocidad a la que la muela penetra la pieza.

- **Fuerza de corte:**

- Nomenclatura y unidad: F_c [mm/min]
- Definición: Fuerza tangencial generada en el contacto entre la muela y la pieza

Aparte de los parámetros básicos que podemos encontrar en rectificado plano y cilíndrico, hay ciertos parámetros que caracterizan el proceso, aportando información del proceso y que permiten analizar su eficiencia.

- **Caudal específico de viruta:**

- Nomenclatura y unidad: Q'_w [mm³/s·mm]
- Definición: Es el volumen de material rectificado por segundo por cada mm de anchura de muela abrasiva. Es un dato representativo del proceso.

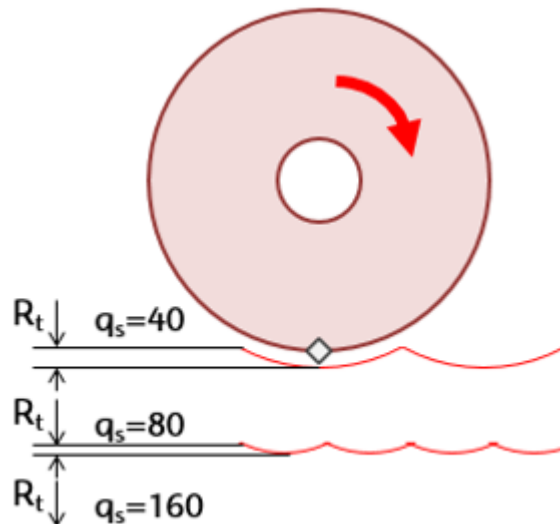
$$Q'_w = \frac{v_f \cdot \pi \cdot d_w}{60} \quad (4)$$

Donde d_w = diámetro de la pieza [mm]

Éste parámetro es de suma importancia en éste proyecto puesto que será el parámetro que defina el límite en el que la pieza empieza a deslizar sobre la superficie de los puntos.

- **Ratio de velocidades:**

- Nomenclatura y unidad: q_s [-]
- Definición: Es la relación entre las velocidades periféricas de la muela y la pieza. Por lo tanto, es un parámetro adimensional. En función de su valor, se puede conocer el tipo de proceso en cuanto a acabado se refiere, es decir, si es un proceso de desbaste o de acabado.



$$q_s = \frac{v_s}{v_w} \quad (5)$$

Tabla 3. Tipos de procesos en función de q_s

Valores orientativos	
Desbaste	60 - 80
Acabado	80 - 120

Figura 17. Arco de contacto en función del ratio de velocidades

- **Energía específica (e_c):**

- Nomenclatura y unidad: e_c [J/mm^3]
- Definición: Mide la energía consumida por volumen unitario de material rectificado. Es un parámetro muy importante a la hora de analizar el proceso ya que aporta información sobre la eficiencia del mismo.

$$e_c = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_c \cdot v_s}{b_s \cdot a_e \cdot v_w} \quad (6)$$

Donde,

P = Potencia consumida [W]

F_t = Fuerza de corte [N]

Tabla 4. Energía específica en diferentes procesos

Valores orientativos	
Torneado o fresado	1
Rectificado	20 -80

5. PROBLEMÁTICA DEL TRABAJO

En el rectificado cilíndrico es necesario controlar las velocidades de rotación tanto de la muela como de la pieza. El perro de arrastre o arrastrador, es un útil encargado de transmitir el giro del motor a la pieza, haciendo que el punto y la pieza giren a la misma velocidad. Sin embargo, el uso del perro de arrastre tiene implícitas una serie de desventajas. Por ello, actualmente se realizan procesos de rectificado cilíndrico con amarre entre puntos y arrastre por fricción, es decir, sin utilizar perro de arrastre, donde los propios puntos son los que hacen girar a la pieza, a través de un par de arrastre T que el punto transmite a la pieza, por fricción. Sin embargo, éste par de arrastre no es muy elevado, y un proceso de rectificado agresivo, es decir, un proceso con un caudal específico de viruta Q'_w y velocidad de avance v_f elevados, puede generar una fuerza de corte F_c tal que genere un par resistente T_r que provoque el deslizamiento de la pieza sobre la superficie del punto. Cuando esto ocurre, se deja de tener control de la velocidad de rotación de la pieza n_w y el proceso resulta insatisfactorio.

El problema es que no se conocen los límites de agresividad a partir de los cuales esto sucede. Es por eso que, los procesos de rectificado en los que se rectifica sin arrastrador se realizan bajo condiciones de corte poco agresivas, es decir, con valores de caudal específico de viruta Q'_w y velocidad de avance v_f bajos.

De esta forma, el presente proyecto busca la obtención de los valores máximos de estos parámetros hasta los que se puede realizar un proceso de rectificado con amarre entre puntos y sin utilizar arrastrador. Es decir, se busca la eliminación del perro de arrastre del proceso de rectificado cilíndrico, siempre y cuando sea posible.

6. SOLUCIÓN PROPUESTA

Para la obtención de los parámetros límites hasta los que es asumible realizar operaciones de rectificado cilíndrico sin perro de arrastre se realiza, en primer lugar, un estudio teórico del par de arrastre T que es capaz de transmitir el sistema de amarre entre puntos a la pieza, a través del contacto existente entre el punto y la pieza. Sin embargo, dicho estudio asume ciertas hipótesis simplificativas, así como una idealización de la superficie de contacto entre el par punto-pieza, que permitan simplificar el cálculo, dentro de unos valores de error admisibles.

De esta forma, se definen una serie de ensayos experimentales, con condiciones de corte cercanas a las calculadas teóricamente, para encontrar los valores máximos de Q'_w , a partir de los cuales la pieza desliza sobre los puntos. En los ensayos experimentales medirá la potencia consumida por el cabezal de la muela y el par ejercido por el eje del punto durante el proceso de rectificado, puesto que es un indicador del par resistente T_r al que está sometida la pieza.

7. DESCRIPCIÓN DE FASES, TAREAS, PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS

En este apartado, se comenta el desarrollo del trabajo de forma resumida, y en orden cronológico. El desarrollo se divide en tres fases fundamentales.

En primer lugar, una formación previa en la que se adquieren los conocimientos de rectificado necesarios para el correcto desarrollo del proyecto.

En segundo lugar, el desarrollo del modelo mecánico que defina, de forma aproximada, el par de arrastre T transmitido en el apoyo entre el punto y la pieza. A través de este valor se pretenden hallar el valor del caudal específico de viruta Q'_w máximo que provoque una fuerza de corte F_c tal que genere en la pieza un par resistente T_r de igual valor y sentido contrario al par de arrastre generado por el punto, momento en el que la pieza empieza a deslizar sobre la superficie de los puntos.

La última fase es la realización de ensayos experimentales en máquina, cuyos ensayos se realizan bajo condiciones de corte cercanas a las condiciones límite calculadas teóricamente, para calcular el caudal específico de viruta Q'_w a partir del cual la pieza desliza en un proceso real y medir el par resistente T_r en el momento en el que la pieza desliza, para contrastarlo con el valor de par de arrastre T calculado.

7.1. FASES, TAREAS Y PROCEDIMIENTOS

FASE 1: Formación

En esta primera fase se adquieren los conocimientos necesarios sobre rectificado, tanto de rectificado plano como de cilíndrico, para el correcto desarrollo del proyecto, que pertenece a este ámbito.

Tarea 1.1. Formación teórica

Se recibe una formación de rectificado, impartida por el personal docente de la Universidad del País Vasco y de IDEKO. De esta forma, se inicia la comprensión de rectificado para un correcto desarrollo del proyecto.

Tarea 1.2. Formación en máquina

Una vez adquiridos los conocimientos necesarios para la comprensión del proceso de rectificado, se recibe una formación en la que se aprende a utilizar rectificadoras CNC.

Por un lado, una rectificadora plana, la BLOHM ORBIT 36 y, por otro lado, una rectificadora cilíndrica, la DANOBAT FG 600S.

Tarea 1.3. Ensayos destructivos de formación

Tras recibir la formación de las máquinas CNC, se realizan una serie de ensayos destructivos para adquirir las habilidades necesarias para la utilización de las máquinas.

FASE 2: Desarrollo modelo mecánico

En esta segunda fase comienza la realización del presente proyecto. El primer paso es el desarrollo de un modelo mecánico que calcule el par de arrastre que se transmite, por rozamiento, por el punto a la pieza, y que dicho par quede definido con una sencilla fórmula matemática que integre todos los parámetros que intervengan en el cálculo de dicho par.

Tarea 2.1. Análisis del apoyo: Medición del área de contacto real

Para realizar el desarrollo del modelo mecánico es imprescindible medir la distribución de la superficie de contacto real existente en el contacto punto-pieza. Para ello se ha optado por utilizar un papel revelador de presión, en concreto el “*Fujifilm Prescale*”.

- **Fujifilm Preescale**

Para la medición del área de contacto real entre punto y pieza se utiliza el papel revelador de presión *Fujifilm Paper* y el microscopio digital *Dino-Lite*.

El procedimiento para la realización de dicho análisis se explica posteriormente en el apartado 9.1.1.

- **Medición por puntos**

Tras observar diferentes resultados de área de contacto en diferentes piezas, se opta por realizar una medición por puntos de los agujeros cónicos de dichas piezas para analizar la redondez y la conicidad de los agujeros, para contrastar los resultados obtenidos a través de la medición con el papel revelador de presión.

Tarea 2.2. Desarrollo de modelo mecánico

Una vez definidas las diferentes geometrías de contacto entre el punto y la pieza se realiza un modelo mecánico que calcule el par de arrastre transmitido en dichos contactos.

Se desarrollan dos modelos mecánicos distintos, en función de los diferentes contactos existentes. Uno, en el que la superficie de contacto se da en toda la superficie troncocónica, y otro en el que la superficie de contacto son tres superficies semi-troncocónicas separadas a 120° entre sí.

Tarea 2.3. Cálculo del par de arrastre

Una vez desarrollada la fórmula para el cálculo del par de arrastre transmitido en el contacto, se calculan los valores de los parámetros influyentes en el cálculo, que son los siguientes:

- F = fuerza axial de compresión
- μ = coeficiente de rozamiento
- α = ángulo de conicidad
- r_1 = radio mayor de la superficie troncocónica
- r_0 = radio menor de la superficie troncocónica
- l = generatriz de la superficie troncocónica

El cálculo de los parámetros está desarrollado en el apartado 0.

Conocidos los valores de los anteriores parámetros, se calcula el valor del par de arrastre transmitido por el punto a las dos piezas analizadas.

Tarea 2.4. Cálculo del caudal específico de viruta límite

Una vez calculado el par de arrastre máximo capaz de transmitir por el punto a la pieza, se procede a definir las condiciones del proceso bajo la que es admisible rectificar sin perro de arrastre. Se escoge el caudal específico de viruta Q'_w como el indicador del límite a partir del cual no es posible rectificar sin perro, ya que es un buen indicador de la agresividad del proceso. El desarrollo matemático para el cálculo del caudal específico de viruta máximo a partir del par de arrastre se encuentra en el apartado 9.4.

FASE 3: Ensayos experimentales

Tarea 3.1. Desarrollo de los ensayos experimentales

Los límites previamente mencionados se calculan utilizando fórmulas teóricas de rectificado. Es por ello que no son valores que se ajusten a un proceso real. Además, el análisis del apoyo a través del cual se calcula el par de arrastre, asume ciertas hipótesis simplificadoras que permiten simplificar el cálculo considerablemente, dentro de unos límites admisibles. Por tanto, en base a estos valores calculados, se definen una serie de ensayos experimentales, cuyo objetivo es hallar el valor máximo real del caudal específico de viruta Q'_w a partir del cual la pieza comienza a deslizarse sobre la superficie del punto y medir el par ejercido por el eje C T_c , puesto que es un indicador del par resistente T_r el que está sometida la pieza justo en el momento en el que empieza a deslizarse.

Tarea 3.2. Pedido y torneado de probetas para ensayos

Para el desarrollo de los ensayos se necesitan probetas. El resto del material necesario para los ensayos se dispone entre el departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV y las instalaciones de IDEKO.

Se decide realizar los ensayos con probetas de acero templado. La ficha técnica de las probetas se adjunta en los anexos. A las probetas se les realiza el agujero del punto y del contrapunto en un torno convencional y con brocas de centrar de metal duro.

Tarea 3.3. Realización de los ensayos

Los ensayos experimentales se realizan en el “*Digital grinding Innovation Hub (DGIH)*” (Figura 3) de IDEKO, en la rectificadora cilíndrica LG 600 B6. Toda la explicación detallada de los mismos se encuentra en el apartado 9.5.

Tarea 3.4. Análisis de los resultados y conclusiones

Por último, se analizan los datos recogidos en los ensayos experimentales. En base a estos resultados, se definen las limitaciones del proceso previamente mencionadas y se redactan unas conclusiones al respecto.

7.2. EQUIPOS

➤ Fujifilm Prescale:

El “*Fujifilm Prescale*” es una película basada en Mylar que contiene una capa de diminutas microcápsulas que se rompen al aplicar una fuerza sobre ellas, produciendo una imagen topográfica instantánea de la variación de presión existente en el área de contacto. Al colocar la película sobre cualesquiera de las dos superficies que contacten y al aplicar presión, ésta revela el perfil de distribución de presiones existente en el contacto de ambas superficies. La intensidad de color de la película está directamente relacionada con la cantidad de presión que se aplica. Cuanto mayor es la presión, más intenso es el color.



Figura 18. Papel de presión "Fujifilm Prescale"

El Fujifilm Prescale se divide en 8 tipos en función del rango de presión que son capaces de medir, los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Clasificación de “Fujifilm Prescale” en función de la presión de medida

Producto (Código)	Rango de presiones [Mpa]								Tipo	
	0.05	0.2	0.5	0.6	2.5	10	50	130		300
	Rango de presiones [psi]									
	7	29	73	87	363	1450	7250	18850	43500	
Super high pressure (HHS)										Mono- hoja
High pressure (HS)										
Medium pressure (MS)										
Medium pressurer (MW)										
Low pressure (LW)										Multi- hoja
Super low pressure (LLW)										
Ultra super low pressure (LLLW)										
Extreme low pressure (4LW)										

Estos 8 tipos se clasifican en dos categorías en función del número de hojas necesarias para la revelación de la distribución de presiones.

- Tipo multi-hoja: Compuesto por dos hojas, la hoja tipo A y la hoja tipo C.
 - Hoja A: Material base recubierto de microcápsulas de color.
 - Hoja C: Material base recubierto de material revelador de color.

Se colocan las bases recubiertas de ambas hojas enfrentándose una a otra. Al aplicar presión, las microcápsulas de la hoja A explotan y se revelan en la hoja C en color rojo.

- Tipo mono-hoja: Las microcápsulas y el material revelador son recubiertas, una encima de otra, en la misma hoja. Al aplicar presión, las microcápsulas explotan y la hoja se revela de color rojo.

➤ **Rectificadora cilíndrica:**

Se ha utilizado la rectificadora cilíndrica LG 600 B6 (Figura 19) con potencia en el cabezal de la muela de 15 kW.



Figura 19. Rectificadora cilíndrica LG 600 B6.

➤ **Muela:**

Se utiliza una muela convencional de alúmina o corindón de Tyrolit, (Figura 20) de nomenclatura CS66A 100.2 HH8 VB3/63 y de dimensiones 450x50x203,2 mm cuyas características se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Características Muela ensayos CBL 80.2IJ8V489

Material de grano	Alúmina o corindón
Diámetro exterior	450 mm
Diámetro interior	203,2 mm
Ancho	50 mm
Tipo de abrasivo	CS
Tamaño de grano	100,2
Grado	H
Estructura	8
Aglomerante	V
Prefijo	B3/63

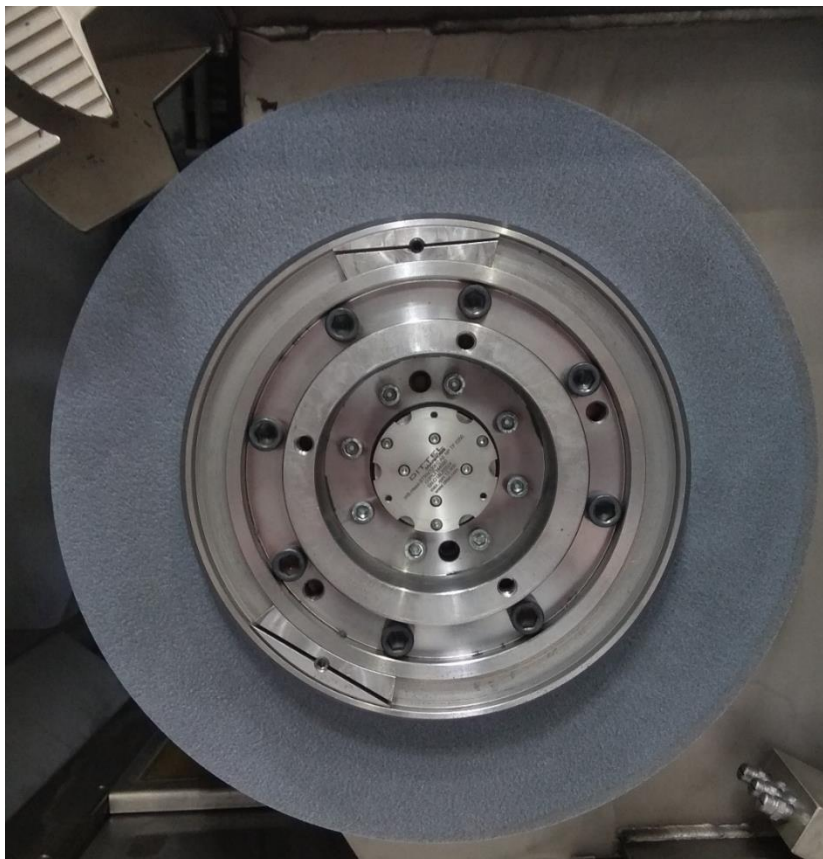


Figura 20. Muela convencional utilizada en los ensayos.

➤ **Máquina de medición por coordenadas:**

Para medir la geometría de los agujeros de las piezas se ha utilizado una máquina de medición por coordenadas (MMC) denominada “Roundscan 555HR” de Jenoptikdel.



Figura 21. Máquina de medición por coordenadas

➤ **Torno convencional:**



Figura 22. Torno convencional

➤ **Brocas de centrar:**



Figura 23. Brocas de centrar de metal duro.

➤ **Probeta:**

Acero templado F-522 de diámetro 50 mm. La ficha técnica de la probeta se adjunta en el Anexo 1 y el plano de la misma se adjunta en el Anexo 2.



Figura 24. Probeta para ensayos de acero templado f-522.

➤ **Calibre pie de rey digital**



Figura 25. Calibre pie de rey digital.

➤ **Microscopio Digital “Dino-Lite”:**

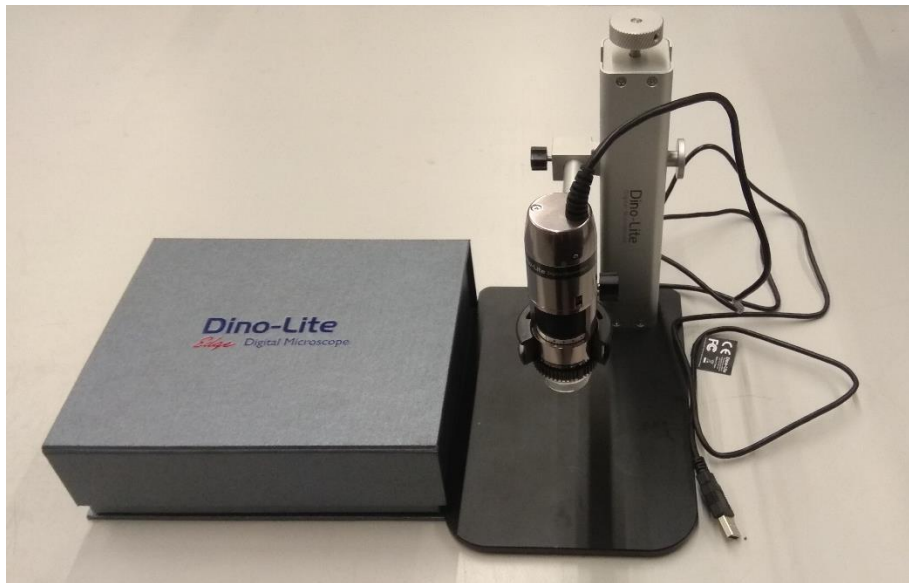


Figura 26. Microscopio digital Dino-Lite.

8. DIAGRAMA DE GANTT

Tabla 7. Diagrama de Gantt

Fases y tareas	Semanas																																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35						
Fase 1	█																																								
Formación en rectificado	█																																								
Formación Plana			█	█																																					
Formación Cilíndrica					█	█																																			
Ensayos destructivos de formación							█																																		
Fase 2								█																																	
Análisis del apoyo								█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█			
Desarrollo de modelo mecánico												█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
Cálculo del par de arrastre																	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
Cálculo del caudal específico de viruta límite																																									
Fase 3																									█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
Desarrollo de ensayos experimentales																									█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█				
Pedido y torneado de probetas para ensayos																																									
Realización de los ensayos																																									
Análisis de los resultados y conclusiones																																									

9. DESARROLLO DEL TRABAJO

La primera tarea del proyecto es el desarrollo de un modelo mecánico que calcule el par de arrastre T que se transmite, por rozamiento, por el punto a la pieza, y que dicho par quede definido con una sencilla fórmula matemática que integre todos los parámetros que intervengan en el cálculo de dicho par.

Para ello, es necesario conocer la distribución de la superficie de contacto real existente en el contacto punto-pieza. Es evidente que el contacto entre ambos cuerpos se dará en una superficie troncocónica, puesto que ambos cuerpos son conos. Sin embargo, se desconocen las dimensiones de dicha superficie. Para calcular dichas dimensiones se realiza el análisis del apoyo.

9.1. ANÁLISIS DEL APOYO: MEDICIÓN DEL ÁREA DE CONTACTO REAL

Con el análisis del apoyo se va a calcular el área de contacto real y se obtendrán los valores reales de r_1 , r_0 y l de la superficie troncocónica de dicho contacto, siendo:

r_1 = radio mayor

r_0 = radio menor

l = generatriz

9.1.1. Fujifilm Prescale

Para el cálculo del área de contacto, se ha optado por utilizar un papel revelador de presión, en concreto el “*Fujifilm Prescale*”. El *Fujifilm Prescale* es una película basada en Mylar que contiene una capa de diminutas microcápsulas que se rompen al aplicar una fuerza sobre ellas, produciendo una imagen topográfica instantánea de la variación de presión existente en el área de contacto.

El papel revelador de presión se introduce en el contacto entre el punto y la pieza. Para ello, el papel es colocado sobre la superficie cónica del punto, como se muestra en la siguiente imagen.

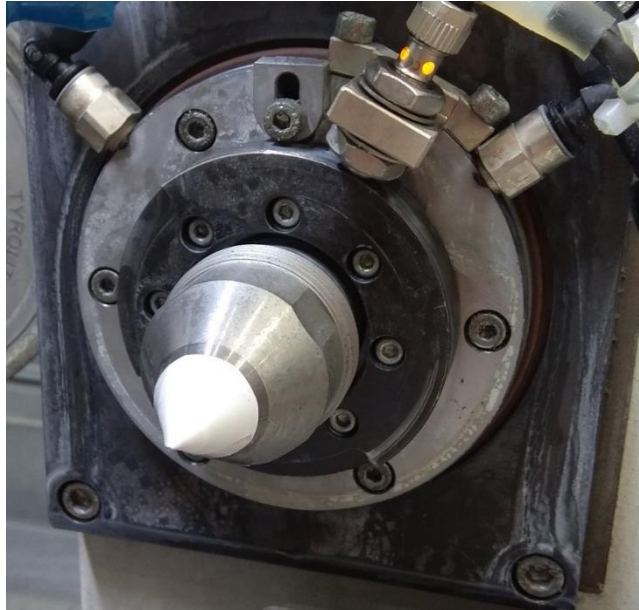


Figura 27. Papel revelador de presión colocado sobre la superficie del punto.

Una vez colocado el papel, se amarra una pieza por puntos. De esta forma, se aplica presión en el contacto donde se encuentra el papel revelador, y es así como éste se revela, visualizando la superficie de contacto real.

El *Fujifilm Preescale* revelado se analiza mediante un microscopio digital de la marca *Dino-Lite*, mediante el cual se pueden hacer mediciones muy precisas de la muestra del papel de presión revelado y calcular así, el área real de contacto.

En el presente proyecto se trabajará con dos piezas a las que se le mecanizan los agujeros denominados puntos, mediante un torno convencional y una broca de centrar de metal duro, puesto que las probetas son de acero templado y una broca de acero rápido no es adecuada para cortar metal duro. La razón de analizar dos piezas es encontrar relación entre los parámetros límites mencionados y la geometría de los puntos de las piezas.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados del análisis del apoyo realizados a los agujeros de los puntos de las dos piezas analizadas.

En la Figura 28 y Figura 29 se muestran los resultados de estos análisis referentes a la pieza 1 en el punto y contrapunto, respectivamente, mientras que en la Figura 30 y Figura 31 se muestran los resultados para la pieza 2.



Figura 28. Contacto entre la pieza 1 y el punto.

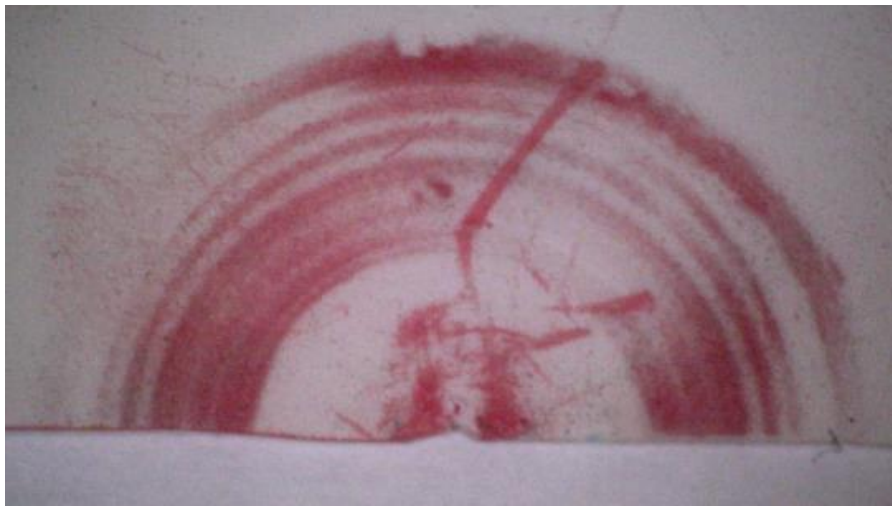


Figura 29. Contacto entre la pieza 1 y el contrapunto.



Figura 30. Contacto entre la pieza 2 y el punto.



Figura 31. Contacto entre la pieza 2 y el contrapunto.

En los resultados del análisis del apoyo se observan diferentes geometrías de superficie de contacto. Por un lado, se observa que tanto en los agujeros del punto y del contrapunto de la pieza 1, como en el agujero del punto de la pieza 2, el contacto se da a lo largo de toda una superficie troncocónica. Sin embargo, en el contacto en el agujero del contrapunto de la pieza 2 se observa que el contacto no se produce en toda la superficie troncocónica, sino en tres superficies equidistantemente distribuidas, separadas a 120° entre sí, dentro de dicha superficie troncocónica.

Esto puede ser provocado por varias razones. Es posible que el punto y agujero cónico de la pieza no tengan la misma conicidad, o puede que la redondez del agujero de la pieza sea la causante de dicho fenómeno.

Por lo tanto, se realiza una medición por puntos de los agujeros cónicos de las piezas, para calcular la redondez y la conicidad del agujero cónico de las dos piezas.

La superficie de contacto se mide posteriormente en el apartado 0.

9.1.2. Medición por puntos

La medición por puntos de los agujeros de las piezas, se realizan en la máquina de medición por coordenadas (MMC) Roundscan 555HR de Jenoptik del “*Digital grinding Innovation Hub (DGIH)*” de IDEKO, cuya ficha técnica se adjunta en el Anexo 1.

Como se ha mencionado anteriormente, se analiza la redondez y la conicidad de los agujeros cónicos de las dos piezas. La redondez de los agujeros se analiza en dos cotas dentro del cono, separadas 1,32 mm entre sí.

Los análisis de la medición por puntos se muestran en la Figura 32 y Figura 33 para el punto y contrapunto, respectivamente, de la pieza 1 y en la Figura 34 y Figura 35 para el punto y contrapunto de la pieza 2. Los resultados de las mediciones se recogen en la Tabla 8.

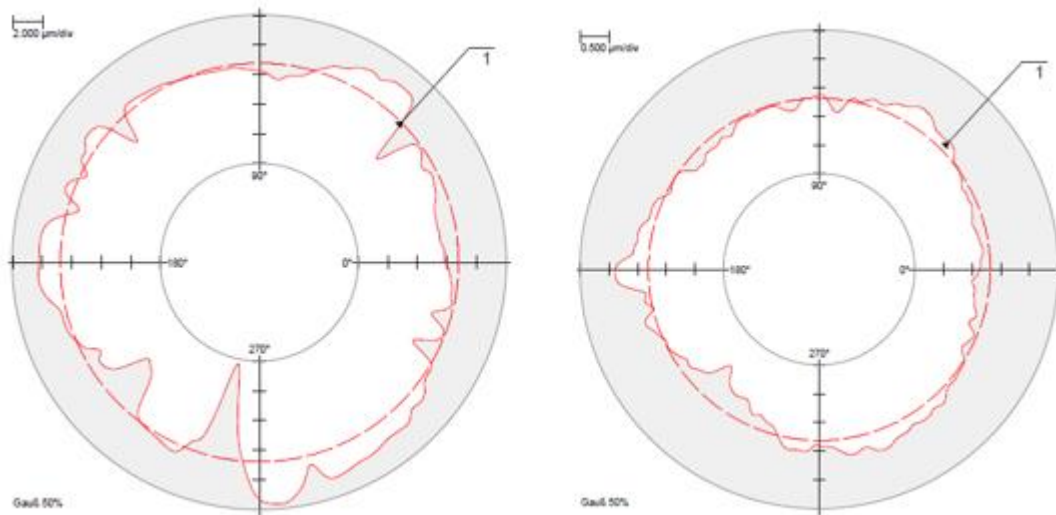


Figura 32. Geometría del agujero del punto de la pieza 1 en dos cotas separadas 1,32mm.

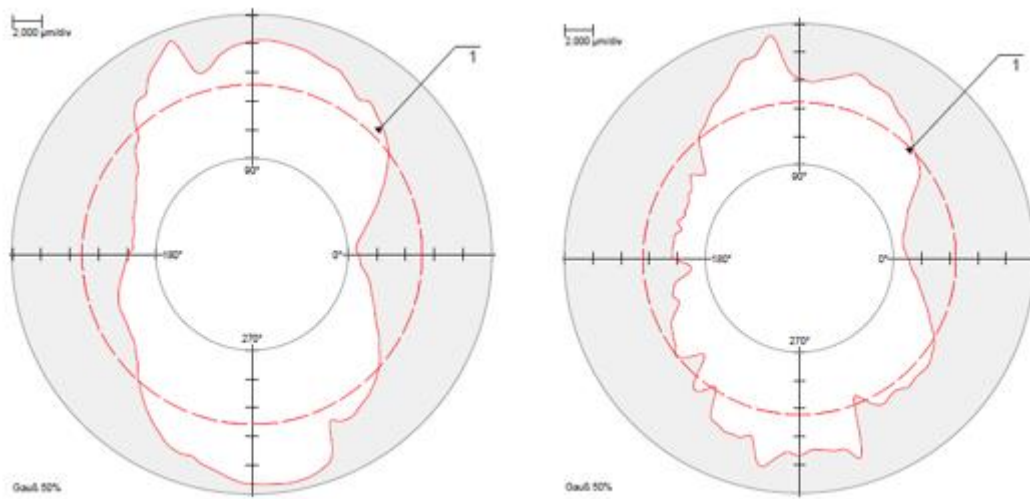


Figura 33. Geometría del agujero del contrapunto de la pieza 1 en dos cotas separadas 1,32mm

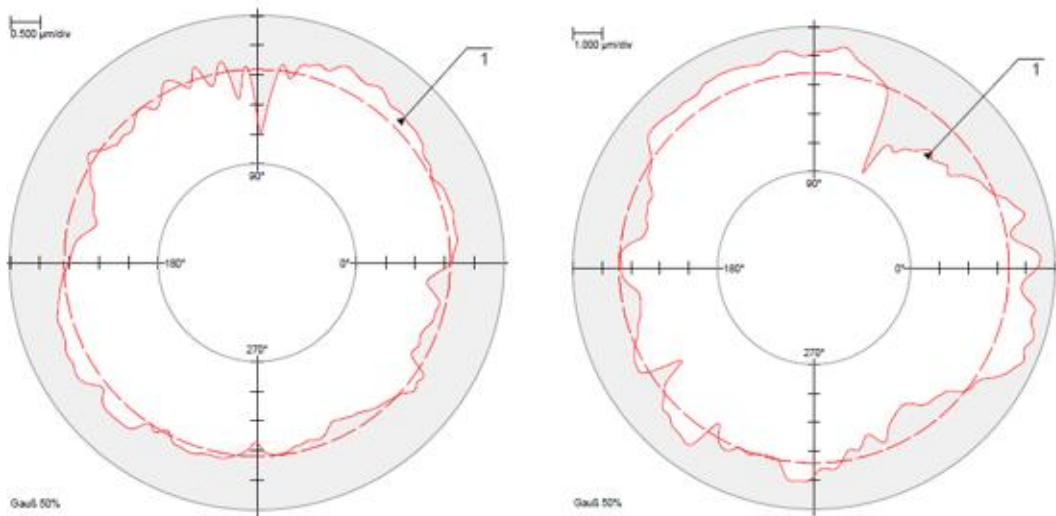


Figura 34. Geometría del agujero del punto de la pieza 2 en dos cotas separadas 1,32mm.

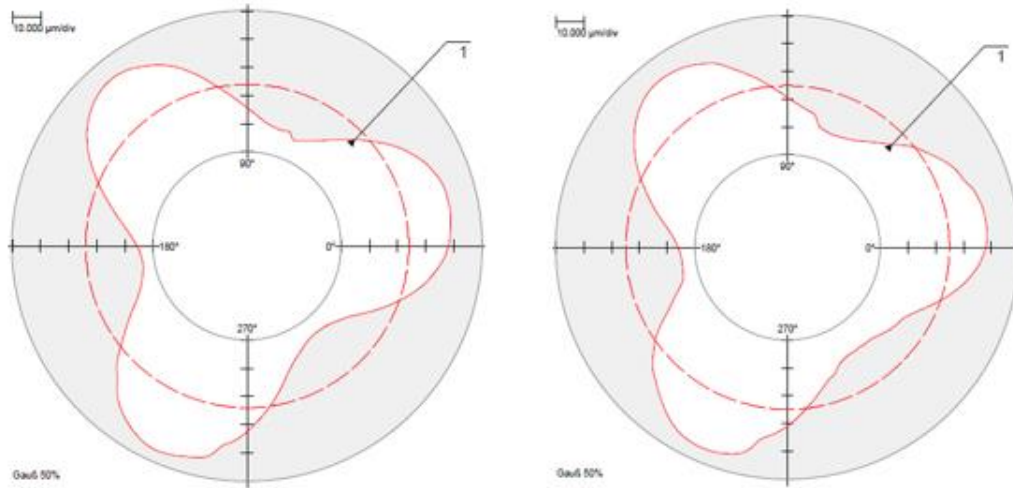


Figura 35. Geometría del agujero del contrapunto de la pieza 2 en dos cotas separadas 1,32mm

Tabla 8. Resultados de la medición por puntos.

Medición	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	Redondez ₁ (μm)	Redondez ₂ (μm)	Conicidad (°)
Pieza 1 - Punto	2,674	3,303	9,33	1,27	59,378
Pieza 1 - Contrapunto	2,166	2,914	8,89	8,54	60,544
Pieza 2 - Punto	2,195	2,963	1,45	4,26	60,519
Pieza 2 - Contrapunto	2,459	3,316	41,74	39,96	59,923

Los resultados de la medición por puntos concuerdan con el análisis realizado con el papel revelador de presión. Los casos en los que el contacto se daba en toda la superficie troncocónica, que son el punto y el contrapunto de la pieza 1 y el punto de la pieza 2, tienen un valor de redondez bajo, menor de 10 μm. Sin embargo, el contrapunto de la pieza 2 tiene una redondez elevada, del valor de 40 μm y se aprecia en los resultados de la medición por puntos, que en este agujero hay un patrón de tres picos separados 120° entre sí, aproximadamente. Esto explica por qué el papel revelador de presión se revela únicamente en tres zonas distribuidas a 120° entre sí en la superficie troncocónica.

9.2. MODELOS MECÁNICOS PARA EL CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE

Una vez analizada la distribución de la superficie de contacto entre el punto y la pieza, se desarrolla un modelo mecánico que calcule el par de arrastre que se transmite en dicho contacto, por fricción, y que quede definido con una sencilla fórmula matemática que integre todos los parámetros que intervengan en el cálculo de dicho par.

Como los resultados del análisis del apoyo muestran que hay dos geometrías de contacto distintas en los diferentes contactos, se realizan dos modelos mecánicos, para definir el par de arrastre transmitido en ambos tipos de contactos.

Ambos modelos suponen que la presión se distribuye homogéneamente en todo el contacto, es decir, suponen que la presión es constante en todo el contacto.

➤ MODELO 1

En este modelo, el contacto entre el punto y el agujero cónico se produce a lo largo de toda una superficie troncocónica, como es el caso del punto y el contrapunto de la pieza 1 y el punto de la pieza 2.

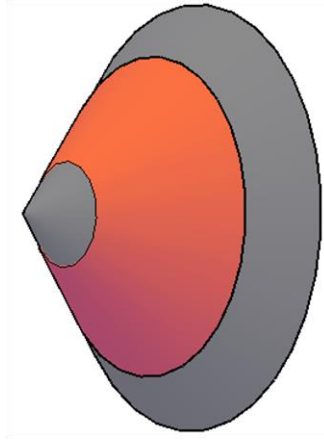


Figura 36. Superficie de contacto del modelo 1.

En la siguiente imagen se muestra el modelo mecánico a estudiar para resolver el valor del par de arrastre transmitido.

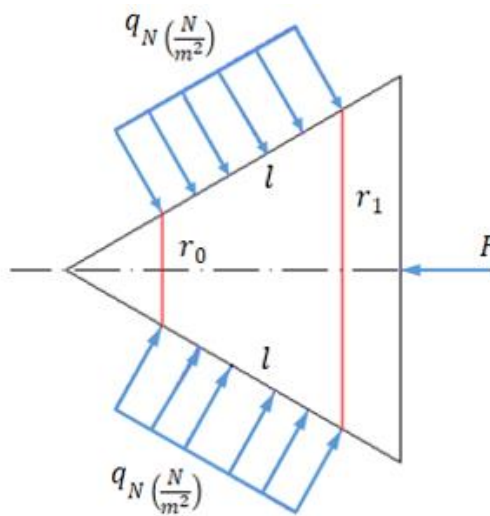


Figura 37. Análisis mecánico.

La superficie troncocónica S queda definida por:

$$S = \pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \quad (7)$$

Donde:

r_1 = radio mayor de la superficie troncocónica

r_0 = radio menor de la superficie troncocónica

l = generatriz de la superficie troncocónica

Además, para el cálculo del par de arrastre según este modelo se utilizan los siguientes parámetros:

F : fuerza axial de compresión, aplicada por el contrapunto.

r : distancia desde el punto de aplicación de cada diferencial de superficie al centro del cono

F_R : fuerza de rozamiento

q_{Fr} : fuerza de rozamiento distribuida a lo largo de la superficie de contacto

N = reacción normal

q_N : reacción normal distribuida a lo largo de la superficie de contacto

α : conicidad del cono

μ : coeficiente de rozamiento existente entre las dos superficies de contacto “ μ ”

A causa de la fuerza axial de compresión F , aplicada por el punto, en la superficie de contacto aparece una reacción normal N , que en este caso es una fuerza distribuida q_N a lo largo de toda la superficie. Al rotar el punto alrededor de su eje axial, se genera una fuerza de rozamiento F_R , que en este caso es una fuerza distribuida q_{Fr} a lo largo de toda la superficie troncocónica.

Por lo tanto, el par de rozamiento se calcula mediante una integral donde se multiplica cada diferencial de rozamiento por la distancia correspondiente desde su punto de aplicación al centro de rotación. De esta forma:

$$T = \int_{r_0}^{r_1} dT = \int_{r_0}^{r_1} q_{Fr} \cdot dS \cdot r \quad (8)$$

Interesa conocer el valor de la fuerza de rozamiento distribuida q_{Fr} y el diferencial de superficie dS en el que está aplicada dicha fuerza en cada punto.

Para hallar el valor de q_{Fr} es necesario conocer el valor de la fuerza distribuida q_N . Para ello, se hace un balance de fuerzas en el eje horizontal X:

$$\sum F_x = 0 \quad (9)$$

$$F = q_N \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

$$q_N = \frac{F}{S \cdot \sin \alpha} \quad (11)$$

$$q_{Fr} = \mu \cdot q_N \quad (12)$$

$$q_{Fr} = \mu \cdot \frac{F}{S \cdot \sin \alpha} \quad (13)$$

$$q_{Fr} = \mu \cdot \frac{F}{\pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \quad (14)$$

El diferencial de superficie dS del tronco de cono tiene la siguiente forma:



Figura 38. Diferencial de superficie de contacto.

Para calcular el valor de dicho diferencial, se supone que ambos radios del tronco de cono tienen el mismo valor, al ser la generatriz de dicho tronco infinitesimal. De esta forma:

$$dS = 2\pi r dl \quad (15)$$

Para calcular el valor de T interea que dS esté en función de dr en vez de dl .

Para ello, conociendo el ángulo de inclinación del cono, que es 30° y aplicando trigonometría (Figura 39)

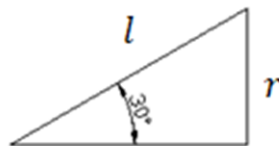


Figura 39. Relación trigonométrica entre r y l .

$$\sin 30 = \frac{r}{l} \quad (16)$$

$$l = \frac{r}{\sin 30} = 2r \quad (17)$$

$$dl = 2 dr \quad (18)$$

$$dS = 4\pi r dr \quad (19)$$

Una vez conocidos los valores de q_{Fr} y dS se calcula el par de rozamiento T .

$$\begin{aligned}
 T &= \int_{r_0}^{r_1} dT = \int_{r_0}^{r_1} q_{Fr} \cdot dS \cdot r = \mu \cdot \frac{F}{\pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \int_{r_0}^{r_1} 4\pi r dr \cdot r = \\
 &= \mu \cdot \frac{4F}{(r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \int_{r_0}^{r_1} r^2 dr = \mu \cdot \frac{4F}{(r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \left[\frac{r^3}{3} \right]_{r_0}^{r_1} = \\
 &= \mu \cdot \frac{4F}{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \cdot (r_1^3 - r_0^3) \quad (20)
 \end{aligned}$$

➤ MODELO 2

En este segundo modelo, el contacto se produce en tres superficies semi-troncocónicas separadas 120° entre sí, como es el caso del apoyo del contrapunto de la pieza 2.

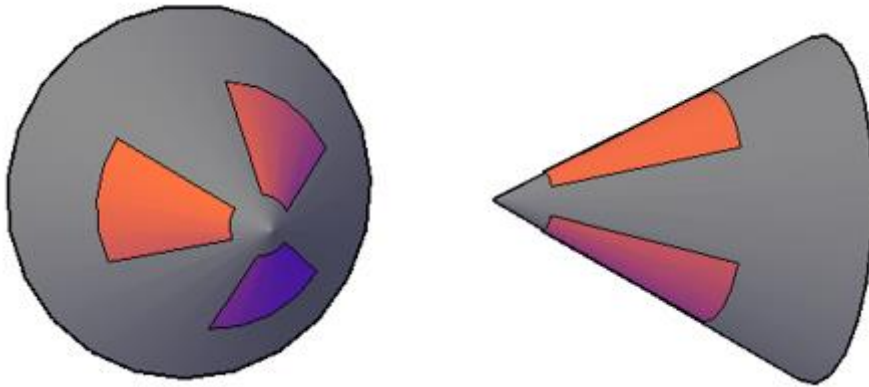


Figura 40. Superficie de contacto del modelo 2.

La formulación matemática del modelo 2 es idéntica a la del modelo 1 (Ecuación 8)

Como se puede observar en la Figura 40, la superficie de contacto S no se da a lo largo de toda la superficie troncocónica, sino en tres superficies semi-troncocónicas. Por lo tanto, la superficie de contacto, en este modelo, se calcula dividiendo la superficie del troncocónica del primer modelo entre 360° y multiplicando dicho valor por la cantidad de grados en los que está distribuido el contacto.

$$S = \frac{\pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l}{360} \cdot \sum \theta \quad (21)$$

Donde,

$\sum \theta$: Cantidad total de grados en los que se distribuye el contacto en la superficie troncocónica.

El valor de la fuerza de rozamiento distribuida q_{Fr} se calcula igual que en el anterior modelo, haciendo un balance de fuerzas en el eje horizontal X.

$$\sum F_x = 0 \quad (22)$$

$$F = q_N \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (23)$$

$$q_N = \frac{F}{S \cdot \sin \alpha} \quad (24)$$

$$q_{Fr} = \mu \cdot \frac{F}{S \cdot \sin \alpha} \quad (25)$$

$$q_{Fr} = \mu \cdot \frac{360 F}{\pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha \cdot \sum \theta} \quad (26)$$

El valor de dS cambia respecto del modelo 1 de igual razón que el valor de S .

$$dS = \frac{4\pi r dr}{360} \cdot \sum \theta \quad (27)$$

$$dS = \frac{\sum \theta \cdot \pi r dr}{90} \quad (28)$$

Por lo tanto, desarrollando la ecuación (8) se calcula el valor del par de rozamiento T:

$$\begin{aligned} T &= \int_{r_0}^{r_1} dT = \int_{r_0}^{r_1} q_{Fr} \cdot dS \cdot r = \mu \cdot \frac{360 F}{\pi \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha \cdot \sum \theta} \int_{r_0}^{r_1} \frac{\sum \theta \cdot \pi r dr}{90} \cdot r = \\ &= \mu \cdot \frac{4F}{(r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \int_{r_0}^{r_1} r^2 dr = \mu \cdot \frac{4F}{(r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \left[\frac{r^3}{3} \right]_{r_0}^{r_1} = \\ &= \mu \cdot \frac{4F}{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \cdot (r_1^3 - r_0^3) \end{aligned} \quad (29)$$

9.2.1. Diferencias entre modelos

Aunque en ambos modelos se suponga una superficie de contacto distinta, el resultado del par de rozamiento es idéntico y responde a la siguiente expresión:

$$T = \mu \cdot \frac{4F}{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \cdot (r_1^3 - r_0^3) \quad (30)$$

La formulación matemática que siguen ambos modelos para el cálculo del par de arrastre, es la misma (Ecuación 8):

Por un lado, en el modelo 1, la superficie de contacto es mayor que en el modelo 2, como ya se ha explicado, por lo que, $S_1 > S_2$. Sin embargo, los valores de S y q_{Fr} son inversamente proporcionales, como se puede apreciar en la ecuación (13).

De esta forma, el valor de $q_{Fr} \cdot S$ se mantiene constante, puesto que al multiplicarse S y q_{Fr} , se compensan sus variaciones.

9.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE

Una vez desarrollada la fórmula para el cálculo del par de arrastre, se calculan los valores de los parámetros influyentes en el cálculo, para poder así calcular el valor del par. Los parámetros a calcular son los siguientes:

- F = fuerza axial de compresión
- μ = coeficiente de rozamiento
- α = ángulo de conicidad
- r_1 = radio mayor de la superficie troncocónica
- r_0 = radio menor de la superficie troncocónica
- l = generatriz de la superficie troncocónica

- **μ :** El coeficiente de rozamiento se define en 0,3, puesto que el contacto se da entre dos aceros.
- **α :** El ángulo de inclinación del cono del modelo mecánico. El valor de este ángulo es la mitad del valor de la conicidad de los puntos. Estando normalizada en 60° la conicidad de los puntos de la rectificadora cilíndrica, el valor de α es 30°.
- **F :** La fuerza axial de compresión aplicada en el amarre de la pieza es un parámetro controlado. Es decir, es un parámetro que se puede ajustar, en base a las necesidades del proceso. La rectificadora LG 600 B-6, con la que se han realizado los ensayos, tiene la capacidad de regular la presión hidráulica de los cilindros de guía del contrapunto y, por tanto, la fuerza axial que éste ejerce sobre la pieza. Los valores de la fuerza axial de compresión que la máquina es capaz de aplicar están recogidos en la siguiente tabla, relacionando la presión hidráulica en los cilindros de guía del contrapunto con la fuerza axial de compresión aplicada.

Tabla 9. Valores de la fuerza axial de compresión de la máquina LG 600 B6.

P (kg/cm ²)	F (kg)	F (N)
5	40	392,5
10	80	785
15	121	1187
20	162	1590

- **r_1, r_0, l :** El valor de los parámetros referentes a la superficie de contacto S , se obtienen de los resultados del análisis del apoyo realizado con el papel revelador de presión, mediante el microscopio digital Dino-Lite, determinando los mencionados.

En el rectificado cilíndrico el punto gira, mediante la acción de un motor y transmite un par de arrastre a la pieza. Sin embargo, el contrapunto se puede comportar de distintas maneras. En el caso del presente proyecto, los ensayos se realizan en una rectificadora cuyo contrapunto es libre, es decir, gira solidario con la pieza, sin ejercer ningún par resistente que se oponga al par de arrastre transmitido por el punto. Por lo tanto, solo se medirán las superficies del contacto entre las piezas y los puntos.

La Figura 41 muestra el análisis de la pieza 1, mientras que la Figura 42 muestra el análisis de la pieza 2.

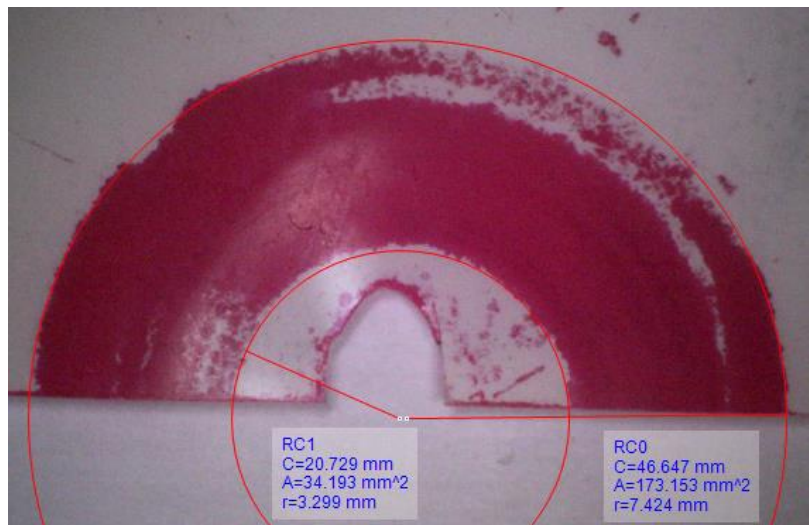


Figura 41. Medición de la superficie de contacto entre la pieza 1 y el punto.

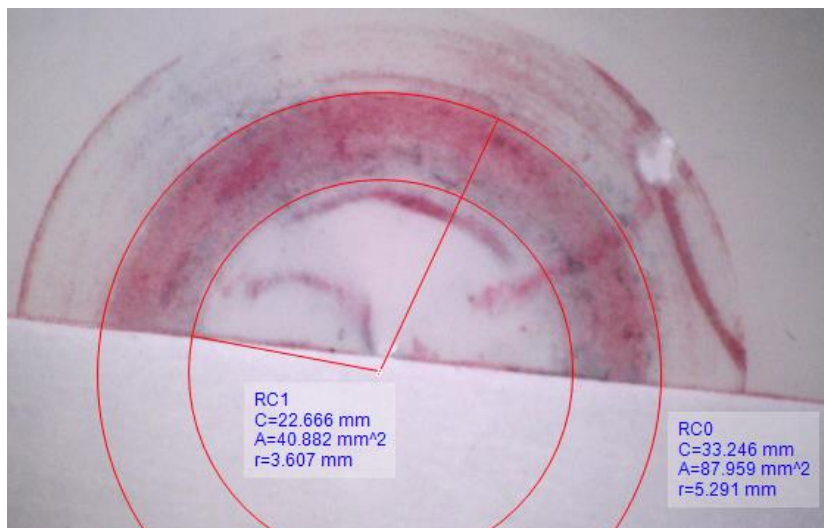


Figura 42. Medición de la superficie de contacto entre la pieza 2 y el punto.

Sin embargo, éstos no son los valores reales de r_1 , r_0 y l que definen la superficie de contacto troncocónica. En la Figura 43 se relacionan los valores medidos en el análisis con el microscopio, que son l_1 , l_0 y l_t , con los valores que definen la superficie troncocónica de contacto real, que son r_1 , r_0 y l .

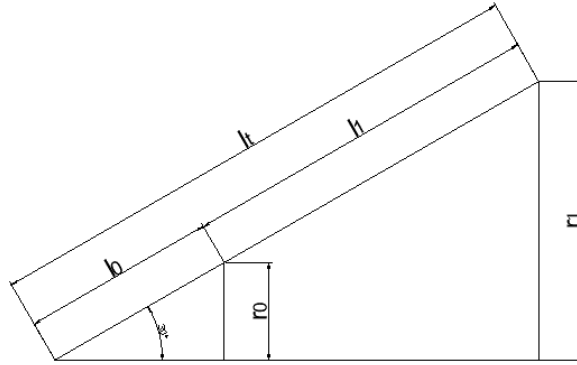


Figura 43. Relaciones entre l_0 , l_1 , r_0 y r_1 .

Aplicando trigonometría:

$$r_0 = l_0 \cdot \sin\alpha \quad (31)$$

$$r_1 = l_1 \cdot \sin\alpha \quad (32)$$

$$l = l_1 - l_0 \quad (33)$$

De esta forma, se calculan los valores de r_1 , r_0 y l para los contactos entre el punto y las dos piezas ensayadas. Los resultados para ambas piezas se muestran a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 10. Resultados de la medición del análisis del apoyo.

Parámetro	Pieza 1	Pieza 2
l_t (mm)	7,424	5,291
l_o (mm)	3,299	3,607
l_1 (mm)	4,125	1,684
r_1 (mm)	3,712	2,645
r_0 (mm)	1,649	1,804
l (mm)	4,125	1,684

Conociendo el valor de todos los parámetros que intervienen en el cálculo, se calcula mediante la ecuación (30) el valor del par de arrastre transmitido, para las diferentes presiones del contrapunto y las dos piezas analizadas, cuyo valor se muestra en la Tabla 11. Los cálculos se desarrollan en el apartado 10.1.

Tabla 11. Cálculo teórico del par de arrastre transmitido por el punto a las dos piezas para las diferentes presiones del contrapunto.

P (kg/cm ²)	T (Nm)	
	Pieza 1	Pieza 2
20	2,86	2,14
15	2,13	1,6
10	1,41	1,06
5	0,71	0,53

9.4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL CAUDAL ESPECÍFICO DE VIRUTA LÍMITE

En el rectificado cilíndrico, la pieza es accionada mediante un par de arrastre, en un sentido de giro, gracias al cual la pieza rota. Sin embargo, al rectificar aparece una fuerza en el contacto entre la pieza y la muela, llamada “Fuerza de Corte”, la cual es tangente al punto de contacto entre ambos. La acción de dicha fuerza sobre la superficie de la pieza, provoca un par en el sentido contrario al par de arrastre, puesto que la pieza y la muela giran en sentido contrario. A este par se le denomina “Par Resistente”. Si el valor del par resistente supera el valor del par de arrastre transmitido por el punto, la pieza desliza sobre la superficie de éste y, como se ha explicado anteriormente, el objetivo del proyecto es evitar este fenómeno, ya que la velocidad de la pieza ha de ser controlada para un correcto proceso de rectificado.

Como se observa en la ecuación (11), el par de arrastre generado y la fuerza de compresión son directamente proporcionales, por lo que, a mayor fuerza de compresión aplicada, mayor par de arrastre transmitido por el punto a la pieza, y por tanto mayor será el límite en el que se pierde el control de la velocidad de giro de la pieza. Sin embargo, hay aplicaciones concretas en las que interesa no aplicar gran fuerza de compresión sobre la pieza. Es por eso, que se hallarán los límites para diferentes fuerzas de compresión, en concreto, para 162, 121, 80 y 40 kg.

Por lo tanto, a continuación, se procede a calcular los parámetros del proceso que crean o generan un par resistente del mismo valor que el par de arrastre transmitido por el punto, siendo de esta forma, los parámetros limitantes para definir un proceso de rectificado sin par de arrastre.

Como ya se ha mencionado, el parámetro que se relaciona directamente con el par resistente T_r , es la fuerza de corte F_c creada en el proceso de rectificado, y se relaciona de la siguiente manera:

$$T_r = F_c \cdot r \quad (34)$$

Siendo r el radio de la pieza en el que está aplicada la fuerza de corte F_c .

Sin embargo, la fuerza de corte no define una limitación global para cualquier proceso, puesto que depende del radio de la pieza que se esté rectificando.

En el rectificado cilíndrico, el parámetro Q'_w llamado caudal específico de viruta, es un buen indicador de la agresividad del proceso. Cuanto mayor sea el valor de dicho parámetro, más agresivo será el proceso sobre la pieza, y viceversa. Además, este parámetro tiene en cuenta el diámetro de la pieza a rectificar. De esta forma, se elige a este parámetro como el indicador del límite que se quiere hallar.

En este apartado no se desarrollarán cálculos. Únicamente se desarrollan las fórmulas que permiten relacionar el parámetro a obtener, que es el caudal específico de viruta máximo $Q'_{w\max}$, con el parámetro conocido, que es el par resistente T_r . Los cálculos se desarrollan en el apartado 10.2.

En primer lugar, se definen los valores de los parámetros con los que se van a realizar los ensayos experimentales, que se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 12. Parámetros fijados para los ensayos.

Parámetro	Definición	Valor
e_c (J/mm ³)	Energía específica	50
b (mm)	Ancho de muela	50
v_s (m/s)	Velocidad de corte (muela)	60
q_s	Relación de velocidades	80
v_w (m/s)	Velocidad de la pieza	0,75
d_w (mm)	Diámetro de la pieza	50

La fuerza de corte F_c se obtiene a partir de su relación con T_r con la ecuación (34).

Con la muela girando a v_s de 60 m/s, para crear una F_c de tal valor, se debe consumir una potencia Pot en el cabezal del siguiente valor.

$$Pot = F_c \cdot v_s \quad (35)$$

El caudal específico de viruta Q'_w , se relaciona con la potencia consumida por el cabezal Pot , con la energía específica e_c y el ancho de muela b_w de la siguiente forma:

$$Q'_w = \frac{Pot}{e_c \cdot b_w} \quad (36)$$

No es necesario calcular el valor de la velocidad de avance v_f , puesto que la rectificadora con la que se realizan los ensayos calcula el valor de dicho parámetro en función de la Q'_w programada. En caso contrario, se calcularía de la siguiente manera:

$$v_f = \frac{Q'_w \cdot 60}{\pi \cdot d_w} \quad (37)$$

En la siguiente tabla se recogen los valores máximos permisibles del caudal específico de viruta Q'_w en función de la fuerza de compresión F aplicada, a partir de los cuales, teóricamente, la pieza debería empezar a deslizar sobre la superficie de los puntos.

Tabla 13. Valores de la velocidad de avance límite para diferentes valores de fuerza de compresión aplicada

Pieza	P (kg/cm ²)	T (Nm)	Fc (N)	Pot (kW)	Q' _w (mm ² /s)
1	20	2,86	114,4	6864	2,75
	15	2,13	85,2	5112	2,06
	10	1,41	56,4	3384	1,35
	5	0,71	28,4	1704	0,68
2	20	2,14	85,6	5136	2,75
	15	1,6	64	5112	1,54
	10	1,06	42,4	2544	1,01
	5	0,53	21,2	1272	0,51

9.5. ENSAYOS EXPERIMENTALES EN MÁQUINA

Se realizarán dos tipos de ensayos experimentales, denominados “Límite” y “Arrastre” respectivamente.

9.5.1. Ensayos “Límite”

Los valores del caudal específico de viruta máximo a partir del cual la pieza se supone que va a deslizar se han calculado utilizando las fórmulas teóricas de rectificado. Es por ello que no son valores que se ajusten a un proceso real. Por tanto, en base a estos valores calculados, se definen una serie de ensayos experimentales, cuyo objetivo es hallar el valor máximo real de este parámetro, a partir del cual la pieza comienza a deslizar sobre la superficie de los puntos.

Todos los ensayos realizados en máquina serán plongeos con una profundidad de pasada constante, fijada en 0,4 mm y se realizarán a lo largo de la superficie externa de la pieza de diámetro 50 mm. La muela se diamantará después de cada plonqueo realizado, con el fin de realizar todos los ensayos con las mismas condiciones de muela.

El resto de parámetros fijos cuyo valor no varía en ningún plonqueo, se recogen en la Tabla 12.

De esta forma, se realizan plongeos con diferentes valores de caudal específico de viruta Q'_w , cercanas al calculado teóricamente. Si la pieza no desliza sobre la superficie de los puntos, se realiza otro plonqueo aumentando el valor de la Q'_w hasta llegar al valor límite en el que la pieza comienza a deslizar. Entonces, el valor previamente anterior, que será, dicho valor menos 0,1, se fija como el caudal específico de viruta máximo a partir del cual la pieza comienza a deslizar sobre la superficie de los puntos.

Si se llega a un caudal específico de viruta del valor de 5,9 sin que la pieza deslice, se fija este valor como el límite. Esto se debe a que para muelas convencionales o de alúmina, no se suele utilizar un valor mayor que tal, por lo que no interesa analizar valores mayores de Q'_w .

Una vez hallado el valor de $Q'_w \max$, se realizan más plongeos, para ese valor de Q'_w y aumentando el valor de q_s . Recordando la ecuación (5), manteniendo fija la velocidad de giro de la muela v_s , si se aumenta el valor de q_s , el valor de la velocidad de giro de la pieza disminuye. Al disminuir la velocidad de rotación de la pieza, se crea más arco de contacto entre la muela y la pieza, provocando una fuerza de corte F_c mayor. Por lo tanto, aumentando el valor de q_s , se genera un par resistente mayor. Se quiere analizar también la influencia de este parámetro en las limitaciones del proceso para rectificar sin perro de arrastre. El límite de este parámetro se fija en 200. En caso de que la pieza no deslice a un caudal específico de viruta concreto con una q_s de 200, se tomará este valor como el límite.

Para saber si la pieza desliza o no sobre la superficie de los puntos, se utiliza un sensor inductor. El sensor se coloca de tal forma, que a cada revolución de la pieza detecte un pulso, como se muestra en las figuras.



Figura 44. Colocación del sensor inductor.

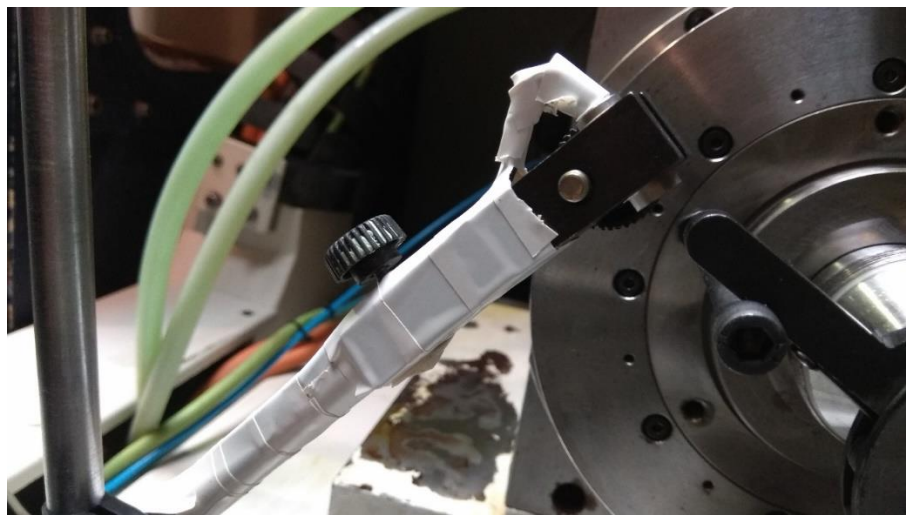


Figura 45. Imagen ampliada de la colocación del sensor inductor.

A través de un programa desarrollado en Python, relacionando los pulsos con el tiempo transcurrido entre cada pulso, se calcula la velocidad de rotación media de la pieza. Si la velocidad de rotación media de la pieza coincide con la programada, significa que la pieza no ha deslizado y el proceso ha sido satisfactorio. En caso contrario, si la velocidad media

de la pieza es menor que la programada, significa que en algún instante la pieza ha deslizado sobre la superficie de los puntos y el proceso no ha sido satisfactorio. En los anexos se adjuntan las mediciones de la velocidad de la pieza a través de dicho programa, para los plongeos en los que la pieza desliza y el plongeoe previo, en el que no desliza.

La rectificadora, dispone de un Tracer a través del cual se visualiza la evolución de la potencia consumida por el cabezal de la muela P_{ot} y el par del eje de la pieza T_C , con el transcurso del tiempo.

Conociendo el valor de la potencia consumida por el cabezal P_{ot} , se halla el valor de la fuerza de corte F_C , a través del cual se espera calcular el valor del par de arrastre real transmitido por el punto a la pieza, y compararlo así con el valor calculado teóricamente.

El valor del par ejercido por el eje $C T_C$ se comparará con los resultados de los ensayos de arrastre.

Puesto que solo se dispone de dos piezas para analizar, los plongeos se hacen en diferentes diámetros de las mismas. Recordando la ecuación (34) el radio de la pieza y el par resistente creado por el proceso son directamente proporcionales. Por tanto, a mayor diámetro mecanizado, el par resistente creado es mayor. De esta forma, las piezas se ensayan de mayor a menor presión del contrapunto, para que el par de arrastre y el par resistente creado varíen de forma similar. Por tanto, los ensayos a la presión de 20 kg/cm^2 se realizarán en diámetros de pieza entre 45 y 50 mm, a 15 kg/cm^2 entre 40 y 45 mm, a 10 kg/cm^2 entre 35 y 30 mm y por último, a 5 kg/cm^2 entre 30 y 35 mm.

9.5.2. Ensayos “Arrastre”

En los ensayos “límite”, en los casos límite en los que la pieza desliza sobre la superficie de los puntos no se observa que la pieza se detenga completamente, sino que ésta reduce sus revoluciones.

Con los ensayos de “arrastre” se quiere analizar la variación del par del eje $C T_C$ cuando la rotación de la pieza es detenida completamente. Para ello, no se aplica un plongeoe sino que se hace girar la pieza a revoluciones bajas, que para este caso se han fijado en 50 rpm, y se detiene con la mano. A través del Tracer de la rectificadora se analiza dicho parámetro.

Al igual que en los ensayos “límite” este proceso se repite para las dos piezas ensayadas a las diferentes presiones del contrapunto.

10. CÁLCULOS

En este apartado se ilustran los cálculos llevados a cabo en los diferentes apartados del proyecto.

10.1. CÁLCULO DEL PAR DE ARRASTRE

Se desarrollan los cálculos para el cálculo del par de arrastre transmitido por el punto a la pieza para las dos piezas ensayadas y las diferentes presiones aplicadas por el contrapunto.

PIEZA 1

$$T = \mu \cdot \frac{4F}{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \cdot (r_1^3 - r_0^3) =$$

$$= 0,3 \cdot \frac{4 \cdot F}{3 \cdot (3,712 + 1,649) \cdot 10^{-3} \cdot 4,125 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 30} \cdot ((3,712 \cdot 10^{-3})^2 - (1,649 \cdot 10^{-3})^2) =$$

$$= \frac{F}{556,09} \quad (38)$$

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{1590}{556,09} = 2,86 \quad (39)$$

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{1187}{556,09} = 2,13 \quad (40)$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{785}{556,09} = 1,41 \quad (41)$$

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{392,5}{556,09} = 0,71 \quad (42)$$

PIEZA 2

$$T = \mu \cdot \frac{4F}{3 \cdot (r_1 + r_0) \cdot l \cdot \sin \alpha} \cdot (r_1^3 - r_0^3) =$$

$$= 0,3 \cdot \frac{4 \cdot F}{3 \cdot (2,645 + 1,804) \cdot 10^{-3} \cdot 1,684 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 30} \cdot ((2,645 \cdot 10^{-3})^2 - (1,804 \cdot 10^{-3})^2) =$$

$$= \frac{F}{741,29} \quad (43)$$

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{1590}{741,29} = 2,14 \quad (44)$$

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{1187}{741,29} = 1,60 \quad (45)$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{785}{741,29} = 1,06 \quad (46)$$

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$T = \frac{392,5}{741,29} = 0,53 \quad (47)$$

10.2. CÁLCULO DEL CAUDAL ESPECÍFICO DE VIRUTA Q'_w MÁXIMO PERMISIBLE

En este apartado se desarrollan todos los cálculos realizados para el cálculo del valor del caudal específico de viruta Q'_w que genera un par resistente del valor del par de arrastre calculado en el apartado anterior. Los valores de los pares resistentes mencionados se recogen en la Tabla 11.

Se analizan dos piezas distintas y cada una de las piezas se ensaya a 4 presiones del contrapunto diferentes. Por lo tanto, se repiten los cálculos análogamente para los 8 casos mencionados.

PIEZA 1

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{2,86 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 114,4 \text{ N} \quad (48)$$

$$Pot = 114,4 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 6864 \text{ W} \quad (49)$$

$$Q'_w = \frac{6864 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 2,75 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (50)$$

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{2,13 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 85,2 \text{ N} \quad (51)$$

$$Pot = 85,2 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 5112 \text{ W} \quad (52)$$

$$Q'_w = \frac{5112 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 2,06 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (53)$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{1,41 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 56,4 \text{ N} \quad (54)$$

$$Pot = 56,4 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 3384 \text{ W} \quad (55)$$

$$Q'_w = \frac{3384 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,35 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (56)$$

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{0,71 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 28,4 \text{ N} \quad (57)$$

$$Pot = 28,4 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 1704 \text{ W} \quad (58)$$

$$Q'_w = \frac{1704 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 0,68 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (59)$$

PIEZA 2

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{2,14 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 85,6 \text{ N} \quad (60)$$

$$Pot = 85,6 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 5136 \text{ W} \quad (61)$$

$$Q'_w = \frac{5136 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 2,05 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (62)$$

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{1,60 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 64 \text{ N} \quad (63)$$

$$Pot = 64 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 3840 \text{ W} \quad (64)$$

$$Q'_w = \frac{3840 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,54 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (65)$$

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{1,06 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 42,4 \text{ N} \quad (66)$$

$$Pot = 42,4 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 2544 \text{ W} \quad (67)$$

$$Q'_w = \frac{2544 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,01 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (68)$$

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_c = \frac{T}{r} = \frac{1,60 \text{ Nm}}{0,025 \text{ m}} = 64 \text{ N} \quad (69)$$

$$Pot = 64 \text{ N} \cdot 60 \text{ m/s} = 3840 \text{ W} \quad (70)$$

$$Q'_w = \frac{3840 \text{ W}}{50 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \cdot 50 \text{ mm}} = 1,54 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (71)$$

11. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

11.1. ENSAYOS “LÍMITE”

En este apartado se muestran y se analizan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

Por un lado, se muestra en las tablas el valor del caudal específico de viruta máximo permisible Q'_w sin que la pieza deslice, así como la potencia máxima consumida por el cabezal Pot , la fuerza de corte generada F_c , el par resistente T_r creado por dicha fuerza de corte y el par máximo ejercido por el eje $C T_c$ en todos los casos.

Por otro lado, se analizan la variación en el tiempo del consumo de la potencia del cabezal de la muela Pot y del par del eje $C T_c$, en los casos límite y en el plongeé previo, para analizar ambos parámetros en el caso límite en el que la pieza comienza a deslizar sobre la superficie del punto. Los gráficos de dichas variaciones se adjuntan en el Anexo 3.

Los gráficos de la variación de la velocidad real de la pieza analizada a través del sensor inductor y el programa desarrollado en Python se adjuntan en el Anexo 3.

PIEZA 1

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 14. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 20 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	v_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
5,9	2,271	49,6	80	290	9652,34	160,9	4,34	3,99	NO
5,9	2,290	49,2	100	233	10317,09	172,0	4,35	4,23	NO
5,9	2,309	48,8	120	196	10368,87	172,8	4,41	4,22	NO
5,9	2,347	48,0	140	170	9652,34	160,9	4,3	3,86	NO
5,9	2,367	47,6	160	150	11101,95	185,0	4,5	4,40	NO
5,9	2,387	47,2	200	120	12752,44	212,5	4,89	5,02	NO

$P = 15 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 15. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 15 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	v_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
5	2,058	46,4	80	309	9517,74	158,6	4,13	3,68	NO
5,3	2,200	46,0	80	311	9797,30	163,3	4,08	3,76	NO
5,5	2,303	45,6	80	314	9942,26	165,7	4,57	3,78	NO
5,9	2,493	45,2	80	317	10700,20	178,3	4,43	4,03	NO
5,9	2,515	44,8	100	256	11621,74	193,7	4,46	4,34	NO
5,9	2,537	44,4	140	184	12069,05	201,2	4,51	4,47	SI
5,9	2,560	44,0	120	208	10186,63	169,8	4,14	3,74	SI
5,9	2,584	43,6	100	263	10669,14	177,8	4,15	3,88	NO
5,9	2,608	43,2	110	241	11396,02	189,9	4,27	4,10	NO
5,9	2,632	42,8	120	223	11255,20	187,6	4,13	4,01	NO
5,9	2,657	42,4	130	208	11226,21	187,1	4,23	3,97	NO
5,9	2,682	42,0	140	195	11265,55	187,8	4,25	3,94	NO
5,9	2,708	41,6	160	172	11182,72	186,4	4,28	3,88	NO
5,9	2,735	41,2	200	139	12077,34	201,3	4,42	4,15	SI

$P = 10 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 16. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 10 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	v_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
4	1,890	40,4	80	351	7361,96	122,7	3,08	2,48	NO
4,5	2,148	40,0	80	353	7983,22	133,1	3,21	2,66	NO
4,6	2,218	39,6	80	393	7192,14	119,9	6,29	2,37	SI
4,5	2,192	39,2	80	398	7656,02	127,6	2,89	2,50	NO
4,5	2,215	38,8	100	322	7753,35	129,2	2,90	2,51	NO
4,5	2,238	38,4	120	271	8113,68	135,2	2,89	2,60	NO
4,5	2,261	38,0	160	206	8430,53	140,5	2,81	2,67	NO

$P = 5 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 17. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 1 a 5 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	v_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
1,5	0,761	37,6	80	377	4046,48	67,4	1,76	1,27	NO
1,75	0,898	37,2	80	381	4346,76	72,4	1,87	1,35	NO
1,8	0,934	36,8	80	390	4437,88	74,0	1,89	1,36	NO
1,9	0,996	36,4	80	385	4479,30	74,7	1,78	1,36	SI

PIEZA 2

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 18. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 20 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	V_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
5,9	2,271	49,6	80	290	9430,76	157,2	4,43	3,90	NO
5,9	2,367	47,6	100	240	10199,05	170,0	4,33	4,05	NO
5,9	2,387	47,2	120	202	11228,27	187,1	4,46	4,42	NO
5,9	2,407	46,8	140	175	12414,88	206,9	5,46	4,84	SI
5,9	2,428	46,4	100	247	11130,95	185,5	4,57	4,30	NO
5,9	2,449	46,0	130	192	11402,23	190,0	4,56	4,37	NO
5,9	2,471	45,6	135	186	11799,80	196,7	4,61	4,48	NO
5,9	2,493	45,2	140	181	12054,56	200,9	4,77	4,54	NO
5,9	2,515	44,8	160	160	11835,04	197,3	4,72	4,42	NO

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 19. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 15 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	V_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
4,5	2,046	42,0	80	341	7954,22	132,5	3,20	2,78	NO
5	2,295	41,6	80	344	8291,78	138,1	3,37	2,87	NO
5,1	2,364	41,2	80	351	8366,33	139,4	3,36	2,87	NO
5,2	2,434	40,8	80	348	11439,51	190,6	4,57	3,89	SI
5,1	2,411	40,4	120	236	9008,30	150,1	3,38	3,03	NO
5,1	2,435	40,0	160	179	9024,87	150,4	3,50	3,01	NO

$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 20. Datos y resultados de los ensayos de la pieza 2 a 10 kg/cm².

Q'_w (mm ² /s)	V_f (mm/min)	d_w (mm)	q_s	n_w (rpm)	Pot (W)	F_c (N)	T_c (Nm)	T_r	Desliza?
2,7	1,302	39,6	80	362	5502,31	91,7	2,28	1,82	NO
2,9	1,412	39,2	80	365	5794,30	96,6	2,39	1,89	NO
3	1,476	38,8	80	369	5879,21	98,0	2,46	1,90	NO
3,2	1,591	38,4	80	373	6127,72	102,1	2,44	1,96	NO
3,3	1,694	37,2	80	389	6189,84	103,2	2,45	1,92	NO
3,4	1,764	36,8	80	385	6102,86	101,7	2,17	1,87	SI
3,3	1,731	36,4	130	245	6231,26	103,9	2,34	1,89	NO
3,3	1,750	36,0	160	197	6245,76	104,1	2,35	1,87	SI

11.2. ENSAYOS “ARRASTRE”

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos “arrastre”. Los valores del par máximo ejercido por el eje $C T_c$ en cada caso se muestran en la siguiente tabla. La variación en el tiempo de dicho valor se muestra en gráficas, las cuales se adjuntan en los anexos.

Tabla 21. Resultados de los ensayos “arrastre”

Pieza	P (kg/cm ²)	T _c (Nm)
1	20	7,2
	15	5,18
	10	3,61
	5	1,93
2	20	5,59
	15	4,47
	10	3,1
	5	1,76

11.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

➤ Par de arrastre T calculado a través del modelo

En la siguiente tabla se muestran los valores del par de arrastre calculado y el par resistente medido en los ensayos a partir del cual la pieza desliza, para las diferentes piezas y presiones del contrapunto.

Tabla 22. Comparativa entre el par de arrastre calculado y el par resistente medido en los ensayos.

Pieza	P (kg/cm ²)	T _{calculado}	T _r
1	20	2,86	5,02
	15	2,13	3,74
	10	1,41	2,37
	5	0,71	1,36
2	20	2,14	4,84
	15	1,60	3,89
	10	1,06	1,87
	5	0,53	-

El par de arrastre calculado teóricamente no coincide con el par de arrastre medido.

Esto puede ocurrir por que el par de arrastre se haya calculado mal teóricamente. De hecho, en el cálculo teórico se parte de la suposición de que la presión es constante en todo el contacto cónico. Sin embargo, si la distribución de la presión no es homogénea y distribuye de manera que haya más presión en la superficie del cono más alejada del eje y menos en la superficie más cerna al eje de rotación, en ese caso, el par transmitido sería mayor que en el caso en el que la presión es constante en todo el contacto, puesto el par transmitido se calcula con una integral en la que se multiplica la presión por el radio en el que está aplicada. Por lo tanto, a mayor radio, mayor par transmitido.

➤ **Parámetros límite: $Q'_{w\ max}$ y q_s**

Los valores del caudal específico de viruta máximo $Q'_{w\ max}$ y de la relación de velocidades q_s a partir del cual la pieza desliza sobre la superficie de los puntos quedan recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 23. Parámetros límites del proceso

Pieza	P (kg/cm ²)	$Q'_{w\ max}$ (mm ² /s)	q_s
1	20	-	-
	15	5,9	160
	10	4,5	160
	5	1,8	80
2	20	5,9	140
	15	5,1	160
	10	3,3	130

Se observa como la pieza 1 aguanta condiciones más agresivas que la pieza 2, sin deslizar, como se había previsto en el apartado 0, donde se ha calculado que, por la geometría de los agujeros, el par de arrastre transmitido por el punto a la pieza 1 es mayor que el transmitido a la pieza 2.

Como ya se ha explicado, son pocos los casos en los que se necesita una presión entre puntos de bajo valor y no resulta de tanto interés analizar este caso, por lo que solo se analiza para la pieza 1, que es sobre la que se ejerce un par de arrastre mayor, por la geometría de su agujero del punto.

En cuanto a la relación de velocidades q_s , se observa que no es un parámetro tan influyente en el par resistente generado. Sí que aumenta el par resistente generado sobre la pieza, pero no de forma tan significativa como el caudal específico de viruta. En el ensayo realizado con una presión de 5 kg/cm², una vez hallado el límite de Q'_w no se aumenta el valor de q_s , puesto que, al ser un caso concreto, no es de interés analizar la relación de velocidades.

➤ **Potencia consumida por el cabezal de la muela *Pot***

A medida que se aumenta el caudal específico de viruta programado en cada plongeé, se parecía un aumento en la potencia consumida por el cabezal de la muela, como es lógico.

En las gráficas adjuntas en los anexos se observa que en el instante en el que el punto no es capaz de transmitir el par suficiente a la pieza para que ésta no deslice, es decir, en el momento en el que la pieza desliza sobre la superficie del punto, se genera una perturbación en la que la potencia consumida por el cabezal de la muela se reduce drásticamente. Éste pico de potencia es el considerado, potencia máxima consumida por el cabezal para el diámetro de pieza concreto en el que se realiza el plongeé.

A partir de dicho valor, se calcula la fuerza de corte generada en el proceso F_c , y multiplicado por el radio de la pieza, el par resistente a partir del cual la pieza comienza a deslizar.

En cuanto a la potencia consumida, en algunos casos se observa como el consumo de potencia no vuelve a ser tan elevado como el valor del pico en el que la pieza comienza a deslizar. Sin embargo, en algún caso particular, se observa cómo después del pico de potencia en el que la pieza desliza, el consumo de potencia vuelve a aumentar hasta valores mayores en los que la pieza desliza.

En las siguientes dos gráficas se observan ambos sucesos.

Por ejemplo, en el plongeé realizado a la pieza 1 a la presión del contrapunto de 10 kg/cm^2 con un valor de Q'_w de $4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$, se ve claramente el primer suceso.

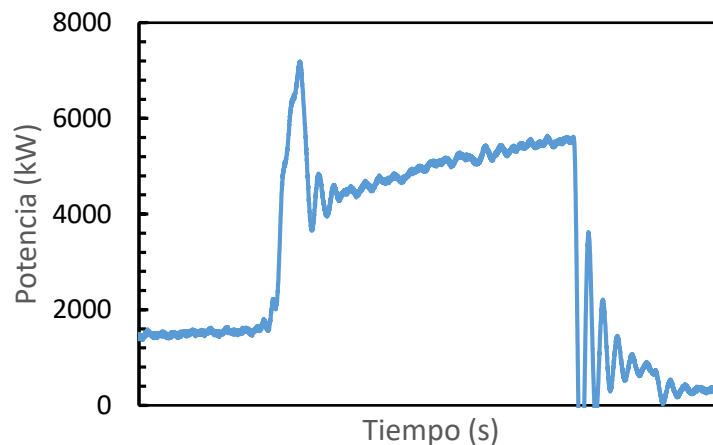


Gráfico 1. Consumo de potencia en la pieza 1 a $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'_w = 4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Sin embargo, en otro plongeé realizado a la pieza 2 a la presión del contrapunto de 15 kg/cm^2 con un valor de Q'_w de $5,2 \text{ mm}^2/\text{s}$, se observa que el consumo de potencia aumenta después de deslizar la pieza hasta superar el valor del pico.

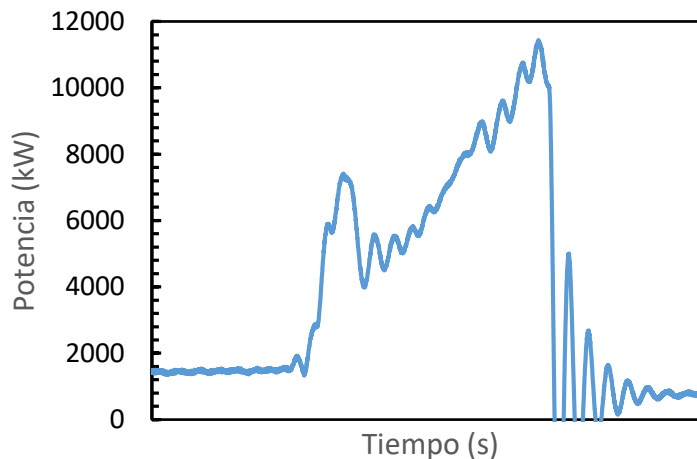


Gráfico 2. Consumo de potencia en la pieza 2 a $P = 15 \text{ kg/cm}^2$ y $Q'w = 5,2 \text{ mm}^2/\text{s}$.

No se aprecian diferencias en el proceso en cuanto a la rotación de la pieza. En ambos casos, tras el primer pico de potencia máxima el punto no es capaz de transmitir el par suficiente y el par resistente creado por la fuerza de corte F_c hace que la pieza deslice sobre el punto. Después de que esto suceda, la pieza ya no vuelve a rotar a la velocidad programada. Sin embargo, la pieza no deja de rotar, sino que disminuye las revoluciones de rotación.

➤ Par ejercido por el eje C T_c

El par ejercido por el eje de C responde de forma similar a la potencia consumida por el eje de la muela, como se puede observar en las gráficas adjuntas en los anexos. Esto se debe a lo siguiente:

Como se ha explicado con anterioridad, el aumento de la potencia consumida implica un aumento del par resistente creado en la pieza. De esta forma, el punto de la rectificadora aumenta su par de rotación, para contrarrestar éste par resistente.

Sin embargo, en el momento en el que la pieza comienza a deslizar, se observa que el par ejercido por el eje C se reduce con la misma tendencia que la potencia consumida. Esto se debe a que, al reducirse el par resistente, la rectificadora reduce el par del eje C al haber menos resistencia oponiéndose al giro de la pieza.

Aun así, una vez que la pieza comienza a deslizar sobre el punto, aunque el par resistente del proceso disminuya, la pieza no deja de deslizar sobre el punto hasta que el proceso termina. Este suceso se observa en todos los plongeos analizados.

A continuación, se muestran las gráficas de la variación del par del eje C T_c en el tiempo de los casos analizados en el apartado de consumo de potencia, para observar como la evolución de ambos parámetros en el tiempo es similar.

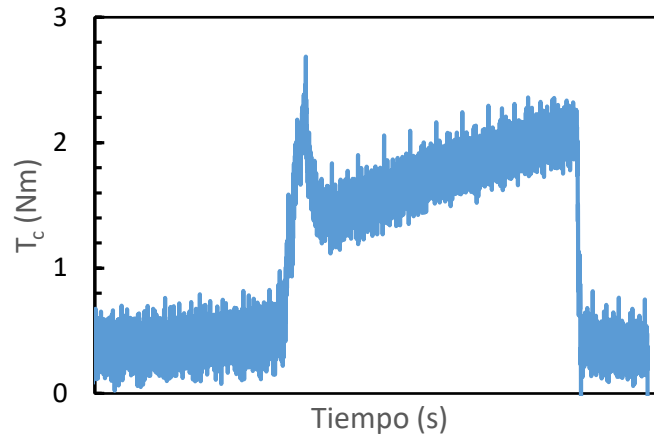


Gráfico 3. Par ejercido por el eje C en la pieza 1 a $P = 10 \text{ kg/cm}^2$ y $Q \cdot w = 4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$.

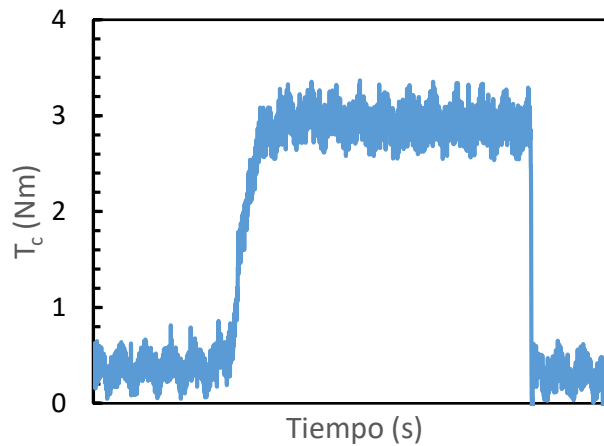


Gráfico 4. Par ejercido por el eje C en la pieza 2 a $P = 15 \text{ kg/cm}^2$ y $Q \cdot w = 5,2 \text{ mm}^2/\text{s}$.

- **Ensayos de “Arrastre”**

Se observan similitudes entre los valores del par del eje C medidos en los ensayos de “arrastre” y los de los casos límites en los ensayos “límite”. En la siguiente tabla se muestran ambos valores para los diferentes ensayos. Para los ensayos “límite” se recoge el valor más pequeño de T_c para el que la pieza comienza a deslizar.

Tabla 24. Comparativa de valores del par resistente medido en los ensayos “arrastre” con el par resistente medido en los ensayos “límite”

Pieza	P (kg/cm ²)	T _C arrastre	T _C límite
1	20	7,01	
	15	5,18	4,72
	10	3,61	2,37
	5	1,93	1,36
2	20	5,7	4,62
	15	4,47	3,89
	10	3,1	1,87
	5	1,76	-

Se observa que, en los ensayos “arrastre” en los que la pieza se detiene completamente, el par del eje C medido es algo mayor que el par del eje C en el caso en el que la pieza comienza a deslizar por la acción de la muela rectificando.

Esto significa, que el par máximo del eje C al que se puede llegar rectificando entre puntos, sin perro de arrastre, se puede definir mediante los ensayos “arrastre”, con un coeficiente de seguridad CS, que se calcula a continuación, lo que supone una gran eficiencia en cuanto a tiempo a la hora de definir el límite del par del eje C al que se puede llegar sin que la pieza deslice.

Tabla 25. Coeficiente de seguridad para relacionar los ensayos “límite” con los ensayos “arrastre”

Pieza	P (kg/cm ²)	CS
1	20	-
	15	0,795
	10	0,657
	5	0,705
2	20	0,811
	15	0,870
	10	0,603
	5	-

Para el caso de la pieza 1 a la presión de 20 kg/cm² no se puede calcular el coeficiente de seguridad puesto que la pieza no ha deslizado en ningún caso ensayado.

De esta forma, el coeficiente de seguridad CS queda fijado para el valor más pequeño de CS calculado, que en este caso es 0,6.

$$CS = 0,6$$

12. ASPECTOS ECONÓMICOS

12.1. DESGLOSE DETALLADO

En este apartado se trata el presupuesto estimado para realización del trabajo desarrollado. Los cálculos se realizan considerando una duración del trabajo aproximada de 35 semanas.

12.1.1. Recursos humanos

Se cuantifican las horas realizadas por el ingeniero técnico investigador, el ingeniero director del proyecto y el maestro del taller. Las horas realizadas por el ingeniero técnico investigador se dividen en el torneado de los puntos de las probetas de ensayos, la realización del análisis del apoyo de las piezas, el desarrollo del modelo mecánico que calcule el par de arrastre transmitido en el contacto entre el punto y la pieza, el trabajo realizado en las diferentes máquinas que osn, la rectificadora cilíndrica y la máquina de medición por coordenadas, el análisis de datos y resultados y por último, la redacción del proyecto.

Tabla 26. Presupuesto de los recursos humanos

Descripción	Horas	Precio unitario [€/h]	Total [€]
Análisis del apoyo	38	13	494
Desarrollo del modelo mecánico	42	13	546
Torneado de probetas	12	13	156
Trabajo en Rectificadora Cilíndrica	24	13	312
Trabajo en Máquina de Medición por Coordenadas	2	13	26
Análisis de datos	48	13	624
Redacción del proyecto	160	13	2080
Trabajo del ingeniero director de proyecto	24	55	1320
Maestro de taller	48	45	2160
PRECIO TOTAL			7718

Total del presupuesto de recursos humanos 7.718 €

12.1.2. Recursos materiales fungibles

Se detallan los precios de todos los recursos materiales que se consumen con el uso.

Tabla 27. Presupuesto de los recursos materiales fungibles

Concepto	Unidad	Precio por unidad [€]	Total [€]
Loseta de diamante	1	200	200
Muela abrasiva convencional	1	200	200
Probeta de ensayos	10	90	900
Fujifilm Paper	1	200	200
Brocas de centrar	3	100	300
Material de oficina			200
Sistema de refrigeración (Taladrina y aceite)			250
PRECIO TOTAL			2250

Total del presupuesto de recursos materiales fungibles2.250 €

12.1.3. Recursos materiales amortizables

Se detallan los precios de los recursos materiales amortizables.

Tabla 28. Presupuesto de los recursos materiales amortizables

Concepto	Tiempo	Precio unitario [€/h]	Total [€]
Torno convencional	12	40	480
Microscopio digital "Dino-Lite"	18	30	540
Rectificadora cilíndrica LG 600 B6	24	60	1440
Máquina de medición por coordenadas Roundscan 555HR	2	60	120
Ordenador personal	210	0,13	27,3
Instrumentos de medición			200
PRECIO TOTAL			2807,3

Total del presupuesto de recursos materiales amortizables2.807,3 €

12.1.4. Presupuesto total de ejecución del proyecto

Recursos humanos	7.718 €
Recursos materiales fungibles	2.250 €
Recursos materiales amortizables.....	2.807,3 €
TOTAL	12.775,3 €
21% IVA.....	2.682,81 €
PRESUPUESTO TOTAL.....	15.458,11 €
<i>Total presupuesto de ejecución de proyecto</i>	<i>15.458,11 €</i>

13. CONCLUSIONES

13.1. ANÁLISIS DEL APOYO

En los dos modelos mecánicos para el cálculo del par de arrastre se parte de la suposición de que la presión se distribuye homogéneamente en toda la superficie de contacto, es decir, que en todos los puntos del contacto hay la misma presión.

Sin embargo, en los resultados de los ensayos se observa como el par resistente a partir del cual la pieza desliza no es del valor calculado teóricamente, sino que es más grande.

Esto se puede deber a que la presión en el contacto no se distribuya uniformemente, sino que haya más presión en la superficie más alejada del centro de rotación, lo que supondría un par de arrastre mayor, más próximo al real.

Por lo tanto, se propone para líneas futuras un nuevo análisis del apoyo, en el que no se suponga presión constante en toda la superficie de contacto. Para ello, se utilizarán papeles reveladores de presión “Fujifilm Prescale” con mayor rango de medición de presiones que el utilizado, para comprobar si se da el caso descrito.

13.2. PARÁMETROS LÍMITES: $Q'_{w\ max}$ Y q_s

Los puntos de las piezas ensayadas no están rectificadas. De hecho, se han fabricado en un torno convencional antiguo con poca precisión. Por lo tanto, es posible que los resultados obtenidos de los parámetros límites no sean precisos. De esta forma, se propone para líneas futuras encontrar los valores límite de $Q'_{w\ max}$ y q_s , en unas piezas con los puntos rectificadas.

13.3. PAR MÁXIMO PERMISIBLE EJERCIDO POR EL EJE C: T_c

Los ensayos de “arrastre” definen un valor representativo del par máximo ejercido por el eje C a partir del cual el punto no es capaz de transmitir el par de arrastre suficiente a la pieza para evitar que ésta deslice. Sin embargo, en la

Tabla 24 de los análisis de los resultados se observa que el valor obtenido de estos ensayos es mayor que el par del eje C al que la pieza comienza a deslizar en un proceso de rectificado.

Por lo tanto, en caso de que se quiera definir un valor de par máximo al que se puede rectificar para otro diámetro de pieza u otra presión del contrapunto diferentes a las ensayadas, se recomienda utilizar el método empleado en los ensayos “arrastre” y aplicar un coeficiente de seguridad de 0,6.

14. BIBLIOGRAFÍA

Catálogos:

- [1] AGORROSIN, S.L. (2012). Piezas de metal duro.
- [2] SENSOR PRODUCTS INC. (2009). Tactile Pressure Indicating Sensor Film
- [3] CMV Hoven GmbH (2016). FujiFilm Preescale

Libros y artículos:

- [4] Pombo Rodilla Iñigo, Izquierdo Aranburu Borja, Ortega Rodriguez Naiara, Plaza Pascual Soraya, Sanchez Galindez Jose Antonio. (2011). 'Fabricación de Alto Rendimiento: Rectificado.
- [5] Lindsay, R. P. (1986). Principles of grinding. In R. I. King, & R. S. Hahn (Eds.), Handbook of modern grinding technology (pp.3071). Boston, MA, Chapter 2.
- [6] Rowe, W. B.(2009) 'Principles of Modern Grinding Technology'.

Páginas web:

- [7] <https://www.ideko.es/>
- [8] <http://www.ik4.es/es/>
- [9] http://www.ehu.es/manufacturing/docencia/1017_ca.pdf
- [10] https://www.youtube.com/watch?v=SkyAf1frz_c

Normas:

- [11] DIN 332 parte 1. Puntos de centrado 60° formas R, A, B y C
- [12] DIN 332 parte 7. Puntos de centrado 60° Procedimientos de determinación.

Programas informáticos:

- [13] Microsoft Office 2016
- [14] Autodesk Inventor Professional
- [15] Spyder-Python
- [16] Dino-Lite

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

*ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL
DE LAS CONDICIONES DE AMARRE DE
PIEZA POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO
CILÍNDRICO*

DOCUMENTO IV - ANEXOS

Alumno/Alumna: Casas, Gayubo, Josu

Director/Directora: Sánchez, Galíndez, José Antonio

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 26,06,2019

ANEXO 1 – FICHAS TÉCNICAS

En el Anexo 1 se adjuntan las fichas técnicas, por un lado, de las probetas compradas a AGORROSIN, S.L. y, por otro, de la máquina de medición por coordenadas “Roundscan 555HR” de Jenoptikdel

1.1. PROBETA CILÍNDRICA



C/ ARRIBURDINA, 17 - POL. IND. DE JUNDIZ - TEL. 945 281 810 - FAX 945 280 715
APDO. 655023 (91082) • E-mail: comercial@aleaceros.com • 01015 - VITORIA-GASTEIZ

AGORROSIN, S.L.

NIF / DNI B20792214
C/HAITZ-ITURRI,6-APDO.279-P.I.
20570 BERGARA
GUIPUZCOA

CERTIFICADO Nº : 618.529

S/REFER. N/REFER. S/Nro. DE PEDIDO... F.CERTIFICADO ALBARAN DE FECHA..
8/02/2019 479.949 8/02/2019

CERTIFICADO DE CALIDAD

DIN 50049-3.1 / EN 10204-3.1

DESCRIPCION DEL MATERIAL

<u>CALIDAD</u>	<u>ESTADO</u>	<u>PERFIL</u>	<u>MEDIDAS</u>
1.2842		RE	51

ANALISIS QUIMICO-COLADA Nro. OB10049056

COMPONENTE	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
PRESENCIA	0,890	1,970	0,250	0,022	0,003	0,350			0,070

CARACTERISTICAS MECANICAS

	<u>DUREZA</u>
RESULTADO	187
UMEDIDA	HB

OBSERVACIONES

<u>Estado</u>	<u>Perfil</u>
L -> Laminado Bruto LT -> Laminado Torneado LG -> Laminado Granallado LF -> Laminado en Frio LR -> Laminado Rectificado	RG -> Redondo LL -> Llantia CH -> Chapa CU -> Cuadrado HE -> Hexagonal TU -> Tubo CO -> Coll (Bobina) PA -> Palanquilla PE -> Perfil Especial
F -> Forjado Bruto FT -> Forjado Torneado FG -> Forjado Granallado FF -> Forjado en Frio FR -> Forjado Rectificado	

1.2. ROUNDSCAN 555HR DE JENOPTIK

Technical data

Formline F435, F455 and Roundscan series

Model	F435 F455	Roundscan 535 555 590
Measuring range		
Distance C/Z axis, max. interfering edge radius	325 mm	370 (420) ¹⁾ mm
Max. test diameter	430 mm	430 (530) ¹⁾ mm
Max. measuring height	350 550 mm	350 550 900 mm
Rotation axis (C axis)		
Table diameter	250 mm	330 mm
Workpiece alignment	automatic	automatic
Roundness error $\mu\text{m}+\mu\text{m}/\text{mm}$ measuring height	0.02+0.0005 μm	0.02+0.0005 μm
Roundness error $\mu\text{m}+\mu\text{m}/\text{mm}$ measuring height ²⁾	0.01+0.00025 μm	0.01+0.00025 μm
Axial run-out error $\mu\text{m}+\mu\text{m}/\text{mm}$ radius	0.03+0.0005 μm	0.03+0.0005 μm
Axial run-out error $\mu\text{m}+\mu\text{m}/\text{mm}$ radius ²⁾	0.015+0.00025 μm	0.015+0.00025 μm
Centering range	± 2 mm	± 5 mm
Leveling range	$\pm 0.6^\circ$	$\pm 1^\circ$
Measuring and positioning speed	1 – 12 1/min.	0.2 – 30 1/min.
Bearing	air	air
Max. charge	400 N	600 (1000) ¹⁾ N
Vertical axis (Z axis)		
Measuring distance	350 550 mm	350 550 900 mm
Straightness error/100 mm	0.15 μm	0.15 0.15 0.25 μm
Straightness error/measuring distance	0.3 0.4 μm	0.3 0.45 1.5 μm
Parallel C-Z/measuring distance	0.8 1.3 μm	0.5 0.8 2.5 μm
Measuring and positioning speed	0.2 – 23 mm/s	0.2 – 50 mm/s
Collision protection	yes	yes
Horizontal axis (R axis)		
Measuring distance	220 mm	220 mm
Straightness error/100 mm	0.3 μm	0.25 μm
Straightness error/measuring distance	0.6 μm	0.5 μm
Squareness C-R	1.2 μm	0.8 μm
Measuring and positioning speed	0.2 – 14 mm/s	0.2 – 50 mm/s
Dimensions/weight		
Length	790 (1010) ³⁾ mm	1990 mm
Width	510 (650) ⁴⁾ mm	750 mm
Height	960 1160 mm	1760 1960 2310 mm
Weight (approx.)	290 300 kg	650 665 685 kg

All accuracy data according to EN ISO 1101 at 20°C $\pm 1^\circ\text{C}$ in vibration neutral environment.
Filter 0–15 rpm LSC, or 2.5 mm LSL; 6 rpm, or 4 mm/s.
All proof on standard under inclusion of the compensation method.

¹⁾ On request

²⁾ Values as maximum deviation from the reference circle LSC, filter 0-15 rpm LSC, 6 rpm

³⁾ R axis extended

⁴⁾ With servo box

Formline CFM3010

Model	CFM3010
Measuring range	
Distance C/Z axis, interfering edge radius ²⁾	162 mm
Max. test diameter	300 mm
Max. measuring height	1250 (1500) mm
Max. traverse distance radial	210 mm
Rotation axis (C axis)	
Face plate	196 mm
Workpiece alignment	tips
Measuring speed	2 – 40 1/min.
Bearing	mechanical
Max. charge	1500 N
Traversing speed	2 – 40 1/min.
Resolution	0.00005*
Positioning accuracy	0.1*
Accuracy	± 0.00028
Run-out accuracy of the roller bearing	0.25 μm
Vertical axis (Z axis)	
Travel distance	1290 (1590) ¹⁾ mm
Measuring distance	1250 (1500) ¹⁾ mm
Collision protection	yes
Positioning speed	5 – 150 mm/s
Positioning error/measuring distance	0.05 mm
Measuring and positioning speed	5 – 150 mm/s
Resolution of the Z scale	0.1 μm
Accuracy	± 3 μm
Straightness axis (X axis)	
Measuring distance	210 mm
Resolution	0.02 μm
Accuracy	± 0.2 μm
Setting range of measurement force	1, 2, 3 and 4 N
Travel in X direction	
Measuring point distance	0.1/0.2/0.5/1
Resolution radial	0.02 μm
Resolution axial	0.1 μm
Dimensions/weight	
Length	1240 mm
Width	1360 mm
Height	2450 mm
Weight (approx.)	2400 kg

¹⁾ On request

²⁾ Standard flat measuring follower, length 43 mm

Technical data

Formline Incometer systems

Model	Incometer V					Incometer VS	Incometer P
	V80	V115	V150	V200	V110	VS120	P100
Diameter of the cylinder ¹⁾	65 – 155 mm					39 – 100 mm	60 – 110 mm
Clamping length min.	20 mm	20 mm	25 mm	30 mm	40 mm	ext. fixture	ext. fixture
Axial measuring range	80 mm	115 mm	150 mm	200 mm	110 mm	120 mm	max. 300 mm
Measuring path on the circumference	360°					360°	360°
Radial measuring range ²⁾	± 400 µm					± 500 µm	± 500/1000 µm ³⁾
Resolution	0.1 µm					0.1 µm	0.1 µm
Number of measured values per rotation	14,400/1,024					14,400/1,024	14,400/1,024
Number of sensors	1					1	max. 7
Repeating accuracy							
Roundness	≤ 1.0 µm					≤ 1.0 µm	≤ 1.0 µm
Cylinder form	≤ 1.5 µm					≤ 1.5 µm	≤ 1.0 µm
Parallelism	≤ 1.5 µm					≤ 1.5 µm	–
Measuring accuracy							
Roundness	≤ 1.0 µm					≤ 2.0 µm	≤ 1.0 µm
Cylinder form	≤ 1.5 µm					≤ 2.0 µm	≤ 1.5 µm
Parallelism	≤ 1.5 µm					≤ 2.0 µm	–
Temperature range of use ³⁾	20 – 40 °C					20 – 40 °C	20 – 40 °C
Power supply	230 V/50 Hz 115 V/60 Hz					230 V/50 Hz 115 V/60 Hz	230 V/50 Hz 115 V/60 Hz
Power consumption	150 W					150 W	150 W
Weight of the sensor	2.9 kg					1.9 kg	8 kg ³⁾

¹⁾ Further diameters on demand

²⁾ Measuring of the warm distortion on demand (up to 130°C)

³⁾ Cylinder bores diameter 60– 80 mm / 80– 110 mm

Product range for Incometer	Ø min/max	Height / depth	Width of part	Laboratory	Production
Cylinder bore	39 – 155 mm	≤ 200 mm	≤ 200 mm	Incometer VS Incometer V	Incometer P
Cylinder liners	39 – 155 mm	≤ 200 mm	≤ 200 mm	Incometer VS Incometer V	Incometer P

ANEXO 2 – RESULTADOS

En el Anexo 3 se adjuntan los resultados de los diferentes ensayos realizados.

2.1. ENSAYOS “LÍMITE”

Se adjuntan los anexos referentes a los ensayos “*Limite*”.

2.1.1. Gráficas: Potencia consumida y Par del eje C

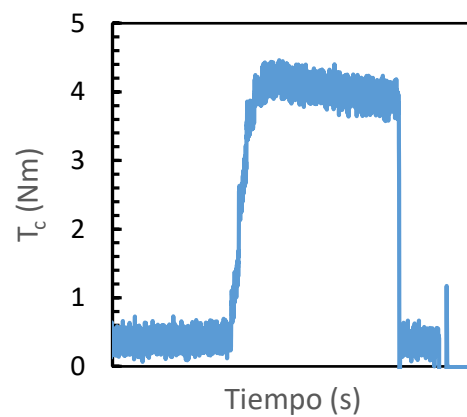
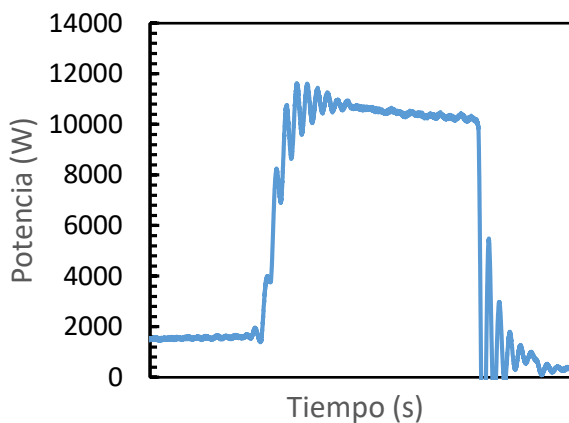
A continuación, se muestran las gráficas de los resultados de los ensayos “Límite”, referentes a la variación en el tiempo del consumo de potencia del cabezal de la muela y el par ejercido por el eje C.

Las gráficas se adjuntan indicando el diámetro de pieza en el que se ha realizado el plongeé, que es característico de cada ensayo en cada una de las piezas.

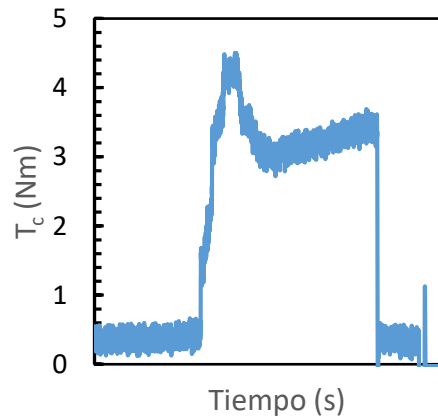
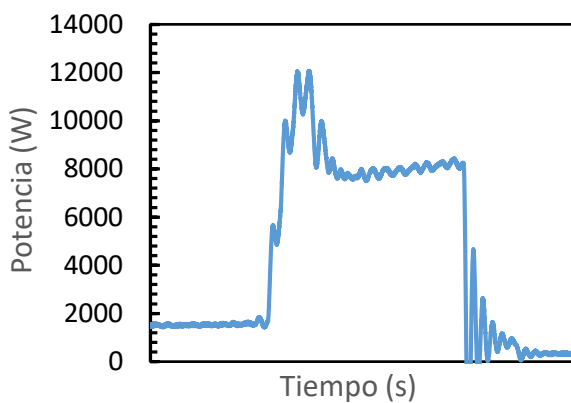
PIEZA 1

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

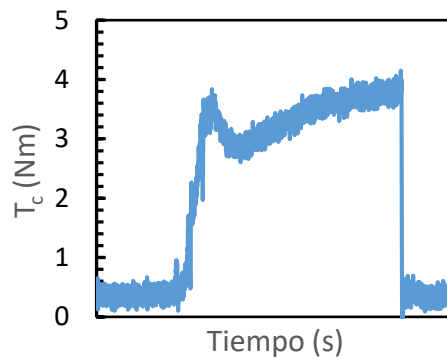
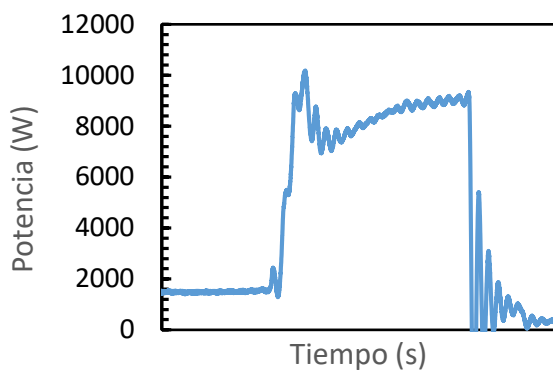
$$d_w = 44,8 \text{ mm}$$



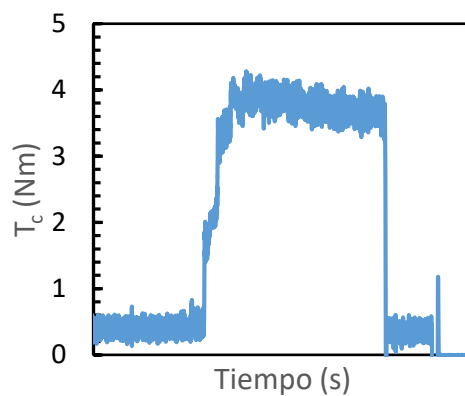
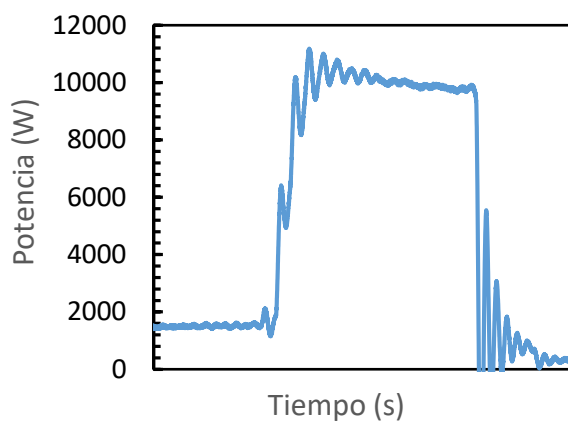
$$d_w = 44,4 \text{ mm}$$



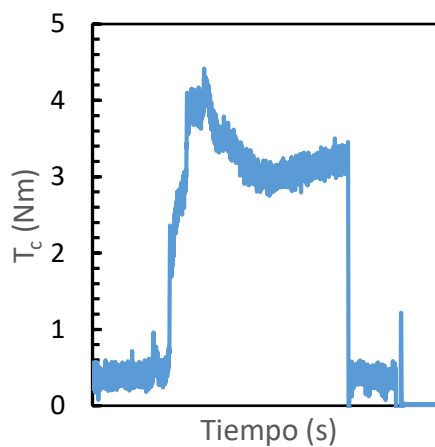
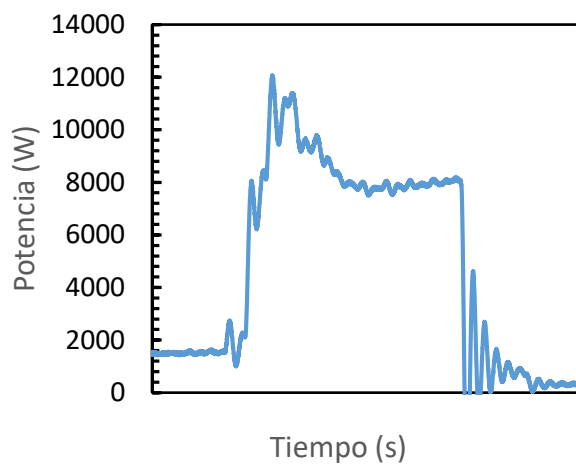
$d_w = 44,0 \text{ mm}$



$d_w = 41,6 \text{ mm}$

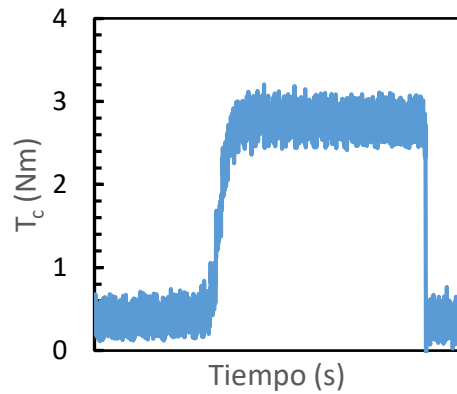
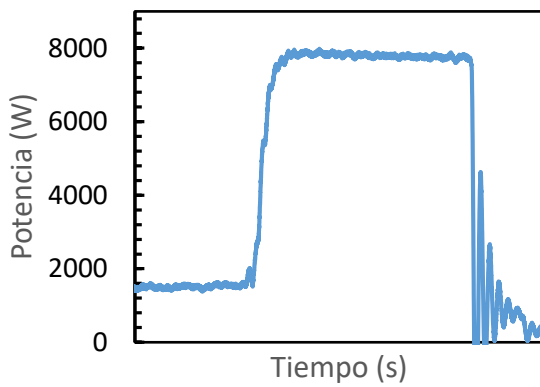


$d_w = 41,2 \text{ mm}$

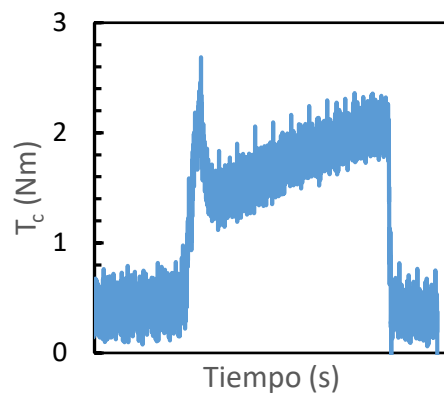
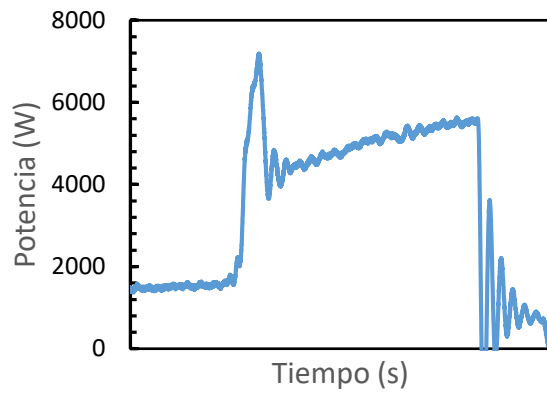


$P = 10 \text{ kg/cm}^2$

$d_w = 40,0 \text{ mm}$

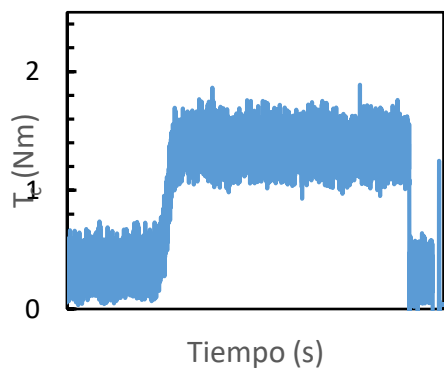
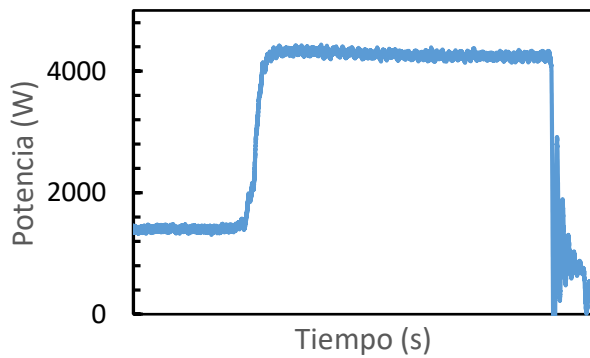


$d_w = 39,6 \text{ mm}$

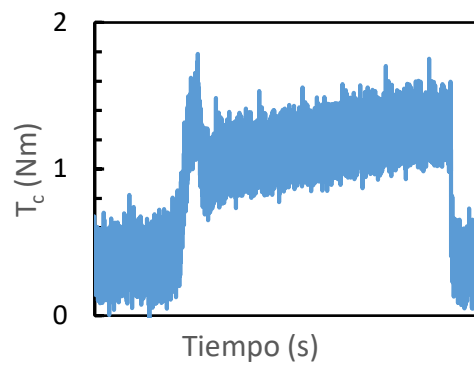
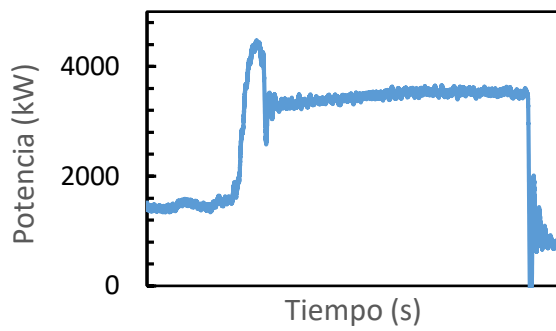


$P = 5 \text{ kg/cm}^2$

$d_w = 36,8 \text{ mm}$



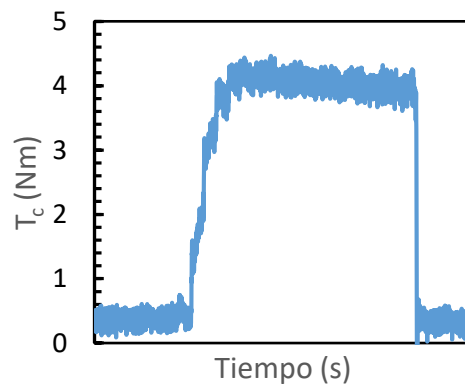
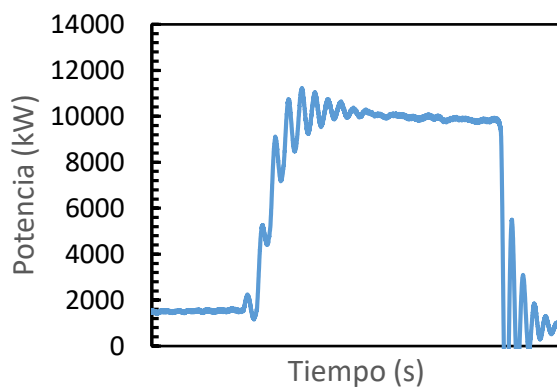
$d_w = 36,4 \text{ mm}$



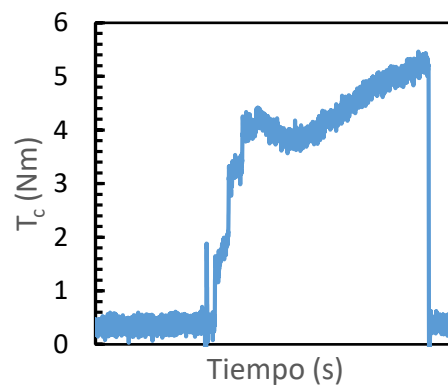
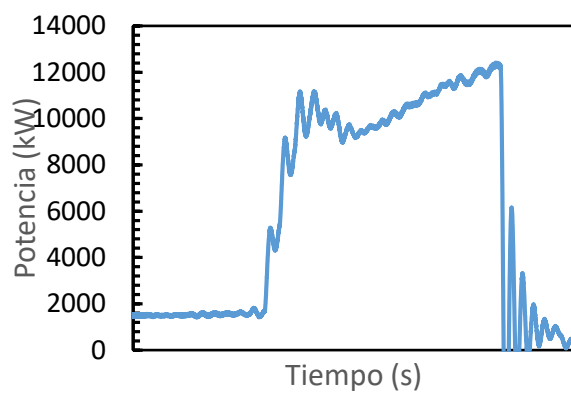
PIEZA 2

$P = 20 \text{ kg/cm}^2$

$d_w = 47,2 \text{ mm}$

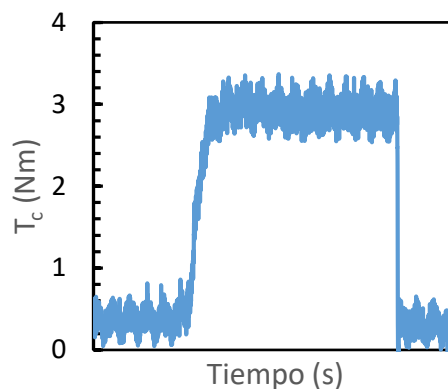
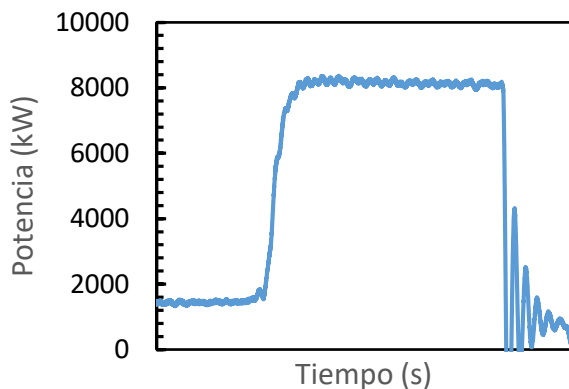


$d_w = 46,8 \text{ mm}$

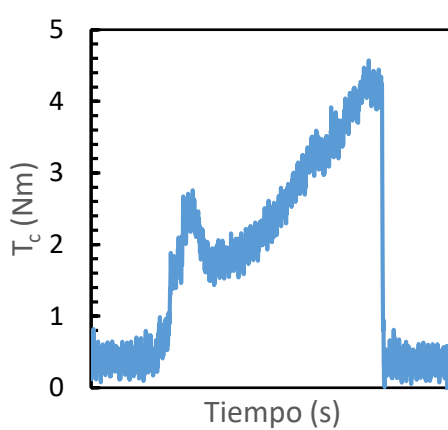
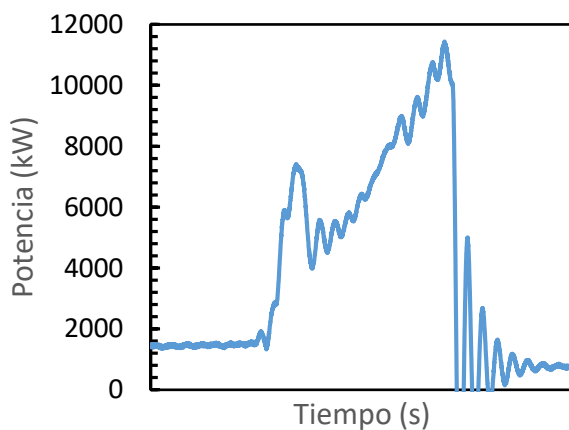


$P = 15 \text{ kg/cm}^2$

$d_w = 41,2 \text{ mm}$

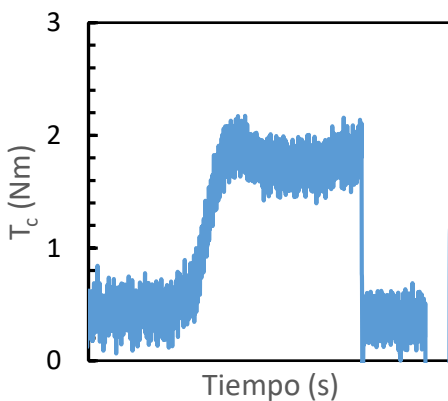
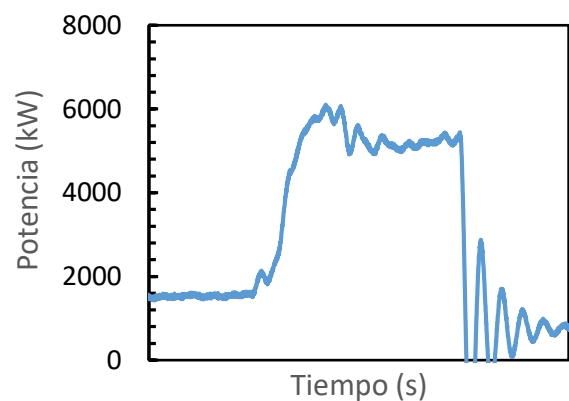


$d_w = 40,8 \text{ mm}$

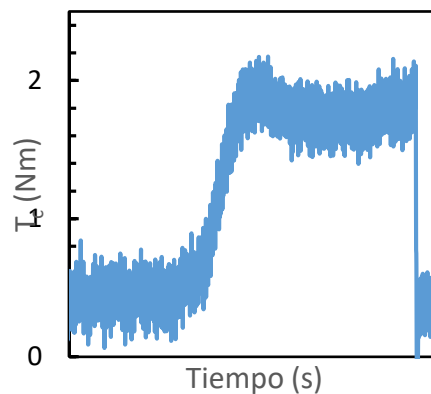
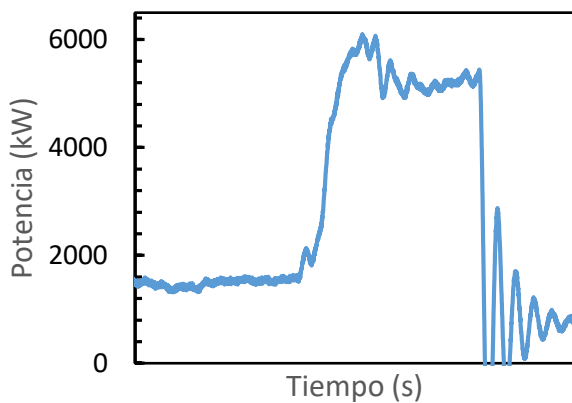


$P = 10 \text{ kg/cm}^2$

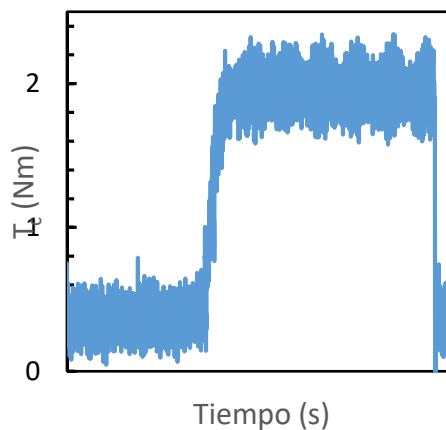
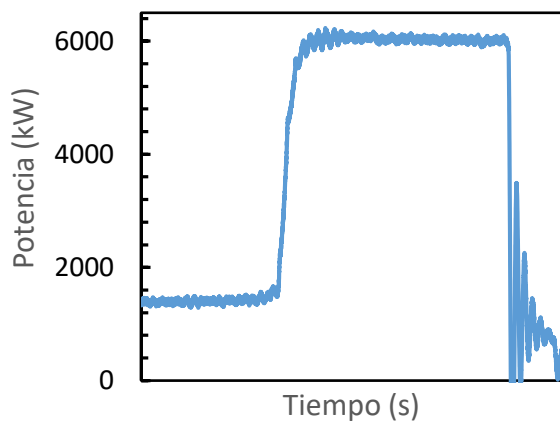
$d_w = 37,2 \text{ mm}$



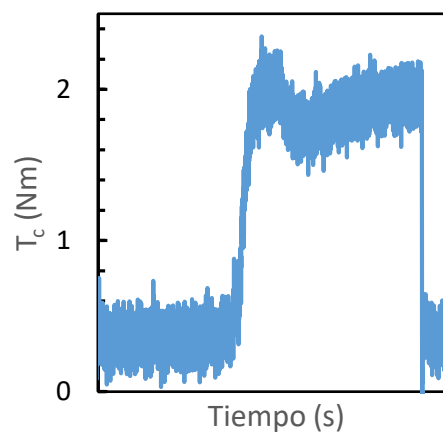
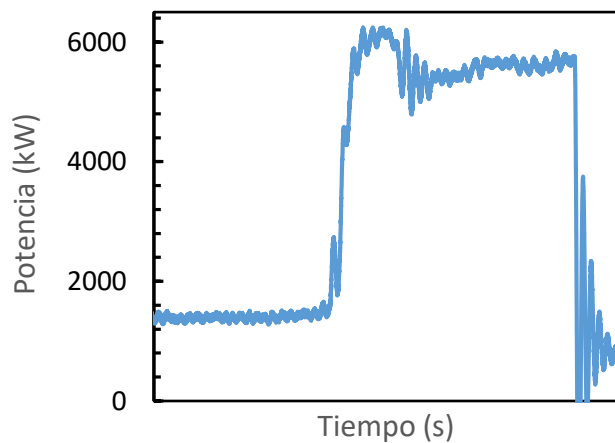
$d_w = 36,8 \text{ mm}$



$d_w = 36,4 \text{ mm}$



$d_w = 36,0 \text{ mm}$



2.1.2. Medición de velocidad de pieza

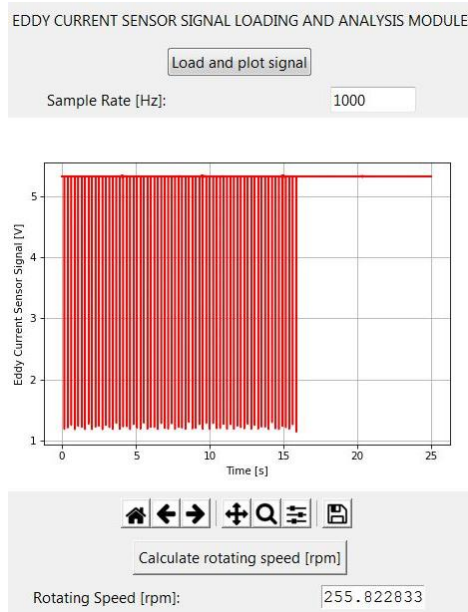
A continuación, se muestran las gráficas de los resultados de los ensayos “Límite”, referentes a la velocidad real de la pieza en todo instante, medido a través del sensor inductor y el programa de Python.

Las gráficas se adjuntan indicando el diámetro de pieza en el que se ha realizado el plongeé, que es característico de cada ensayo en cada una de las piezas.

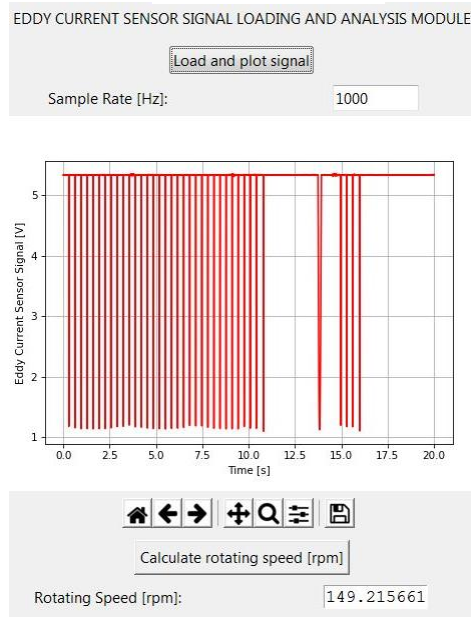
PIEZA 1

$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

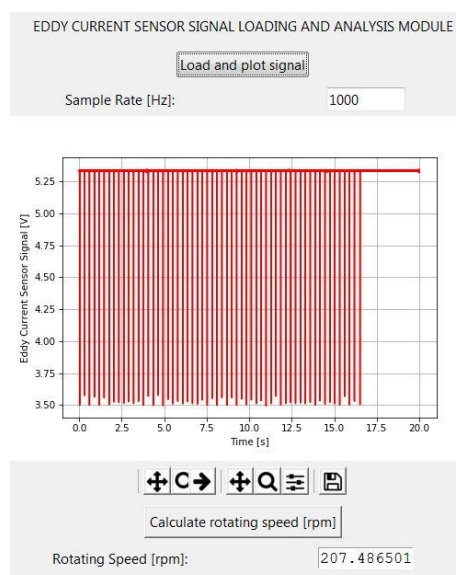
$$d_w = 44,8 \text{ mm}$$



$$d_w = 44,4 \text{ mm}$$



$$d_w = 44,0 \text{ mm}$$

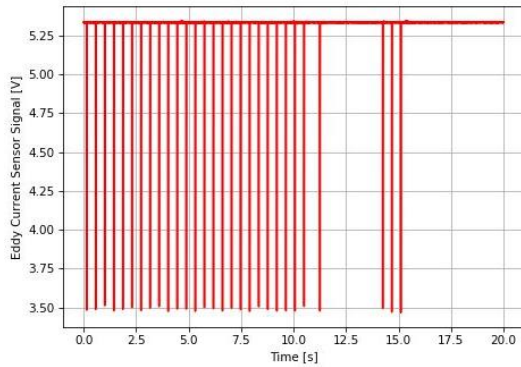


$$d_w = 41,6 \text{ mm}$$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:



Calculate rotating speed [rpm]

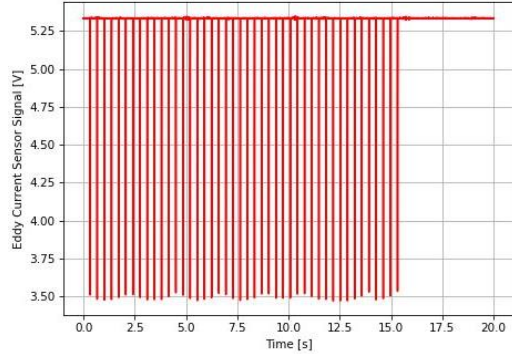
Rotating Speed [rpm]:

$$d_w = 41,2 \text{ mm}$$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:



Calculate rotating speed [rpm]

Rotating Speed [rpm]:

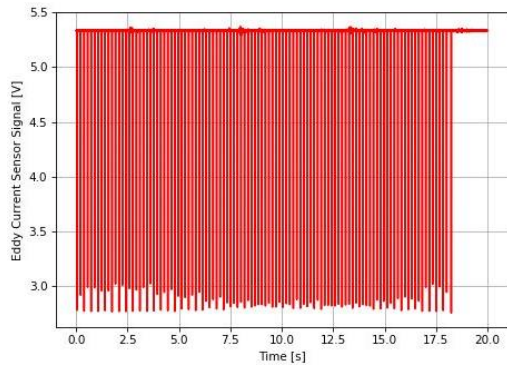
$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_w = 40,0 \text{ mm}$$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:



Calculate rotating speed [rpm]

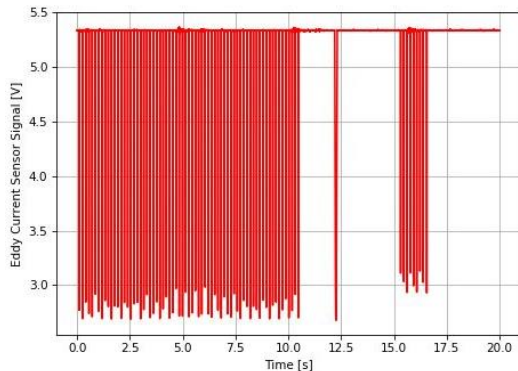
Rotating Speed [rpm]:

$$d_w = 39,6 \text{ mm}$$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:

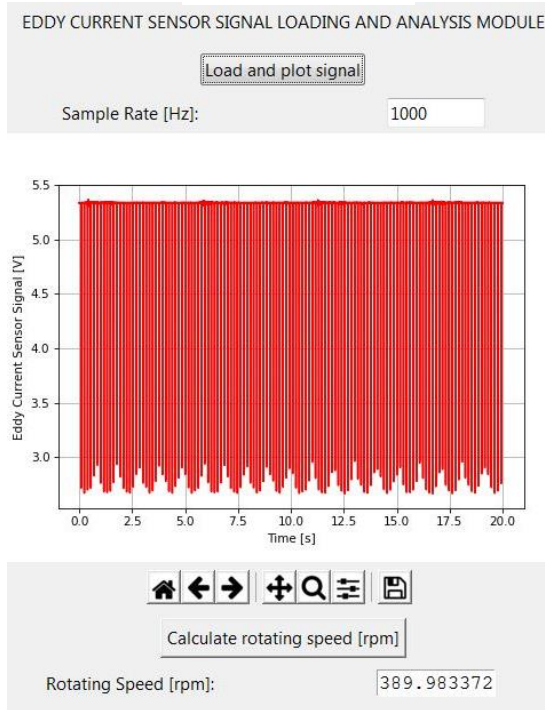


Calculate rotating speed [rpm]

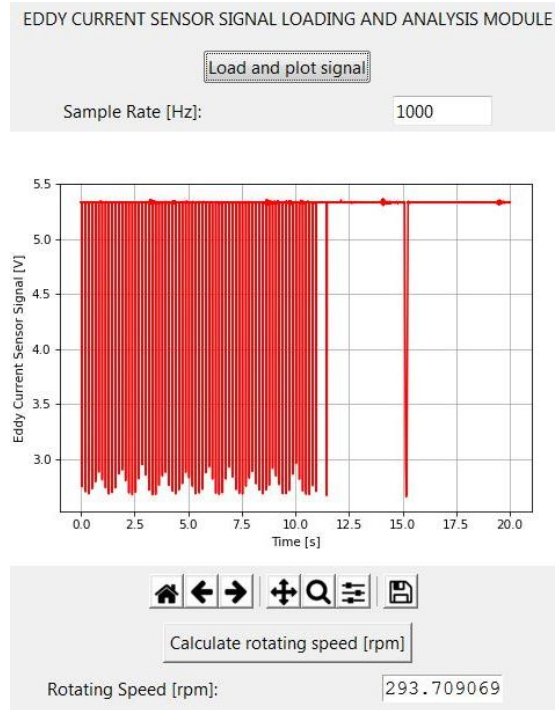
Rotating Speed [rpm]:

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_w = 36,8 \text{ mm}$$



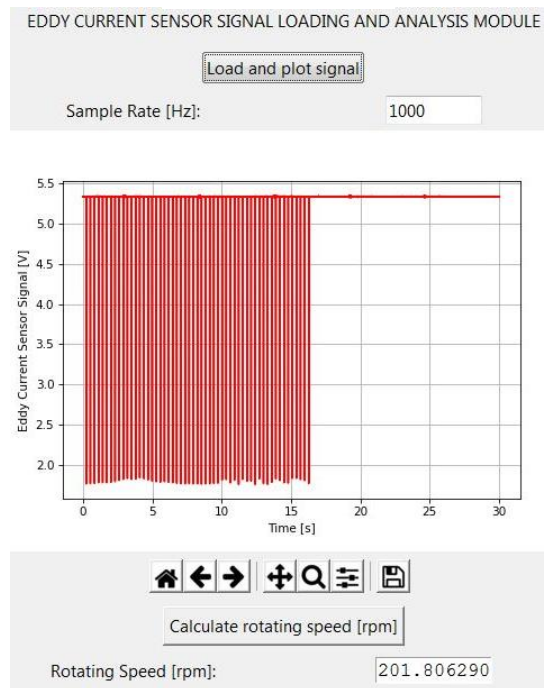
$$d_w = 36,4 \text{ mm}$$



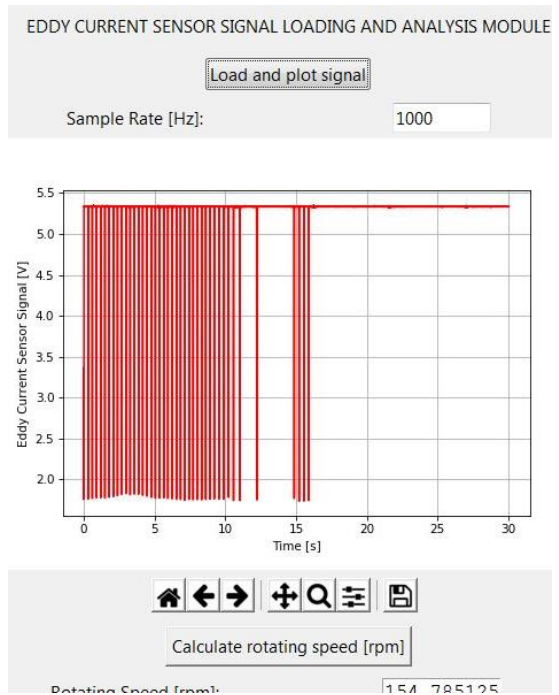
PIEZA 2

$$P = 20 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_w = 47,2 \text{ mm}$$

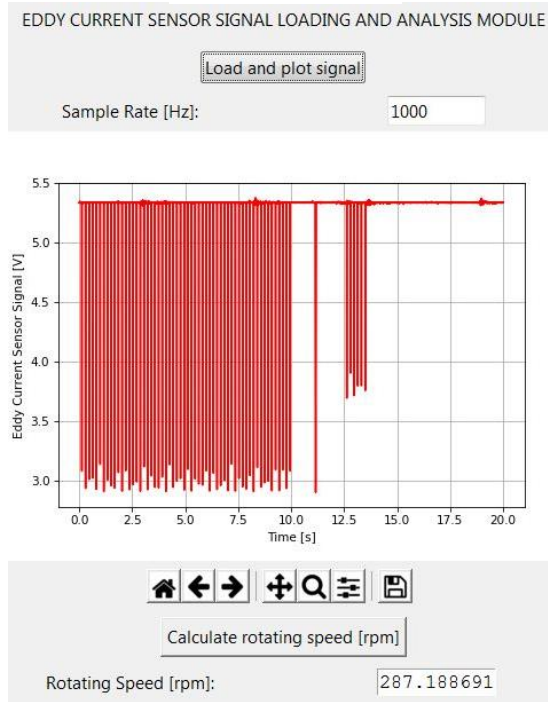


$$d_w = 46,8 \text{ mm}$$

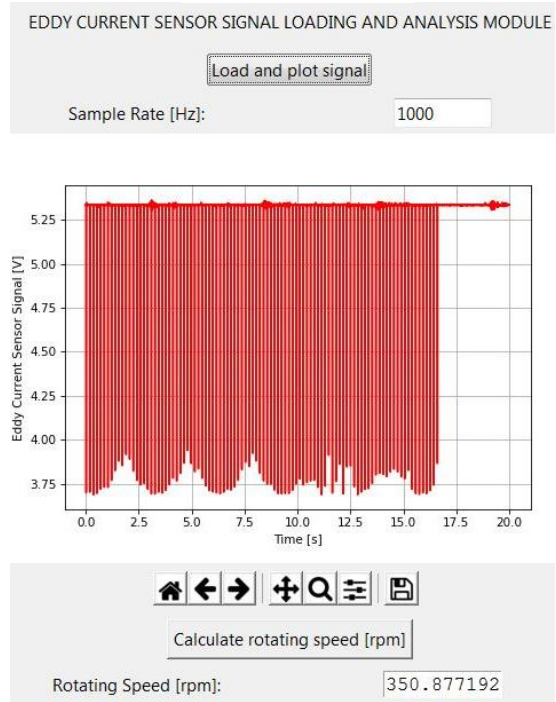


$$P = 15 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_w = 41,2 \text{ mm}$$

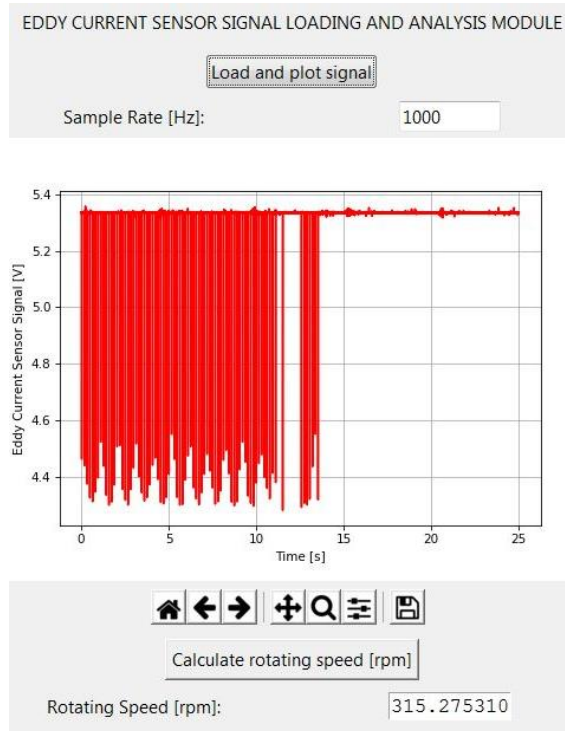


$$d_w = 40,8 \text{ mm}$$

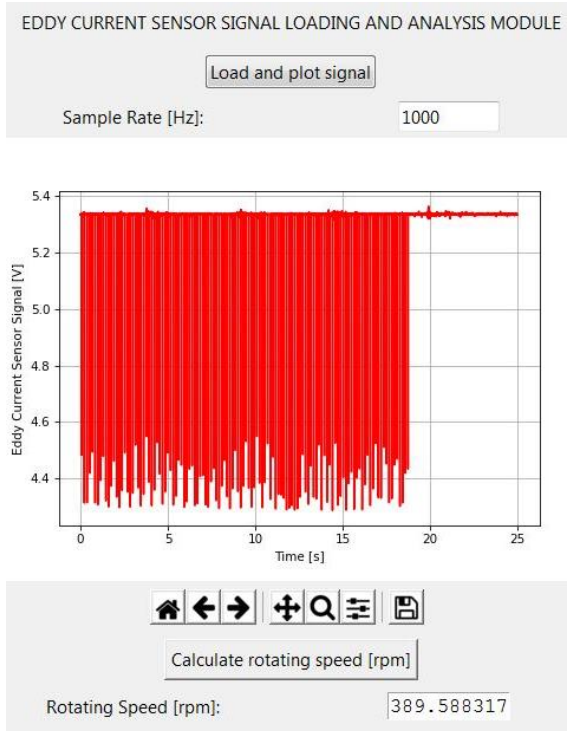


$$P = 10 \text{ kg/cm}^2$$

$$d_w = 37,2 \text{ mm}$$



$$d_w = 36,8 \text{ mm}$$

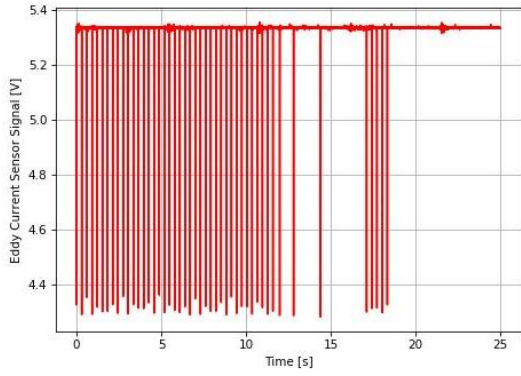


$d_w = 36,4 \text{ mm}$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:



Calculate rotating speed [rpm]

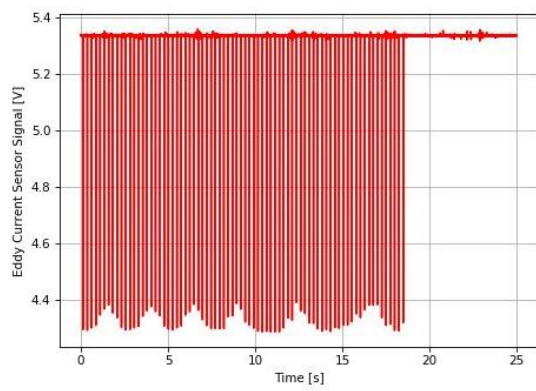
Rotating Speed [rpm]:

$d_w = 36,0 \text{ mm}$

EDDY CURRENT SENSOR SIGNAL LOADING AND ANALYSIS MODULE

Load and plot signal

Sample Rate [Hz]:



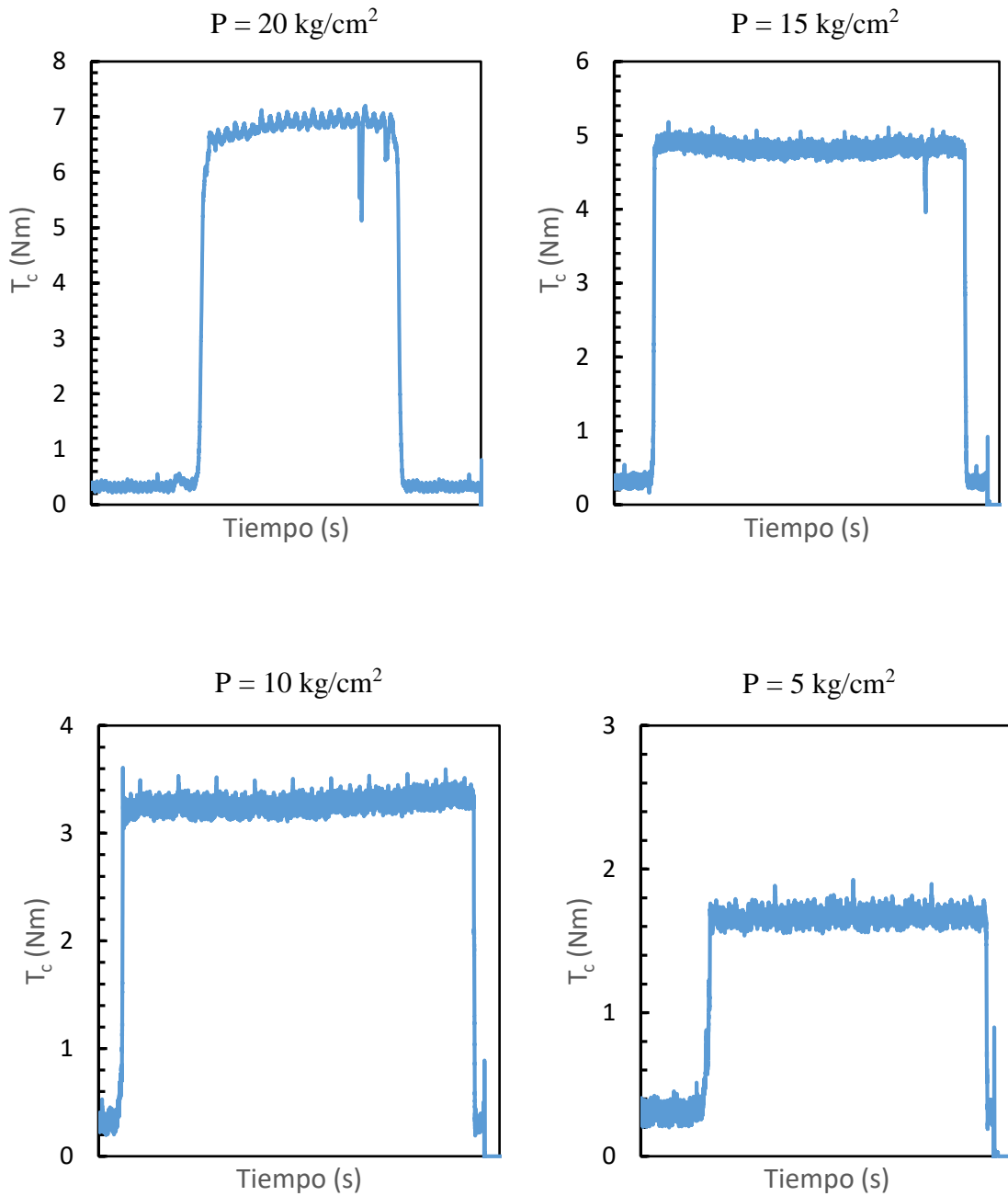
Calculate rotating speed [rpm]

Rotating Speed [rpm]:

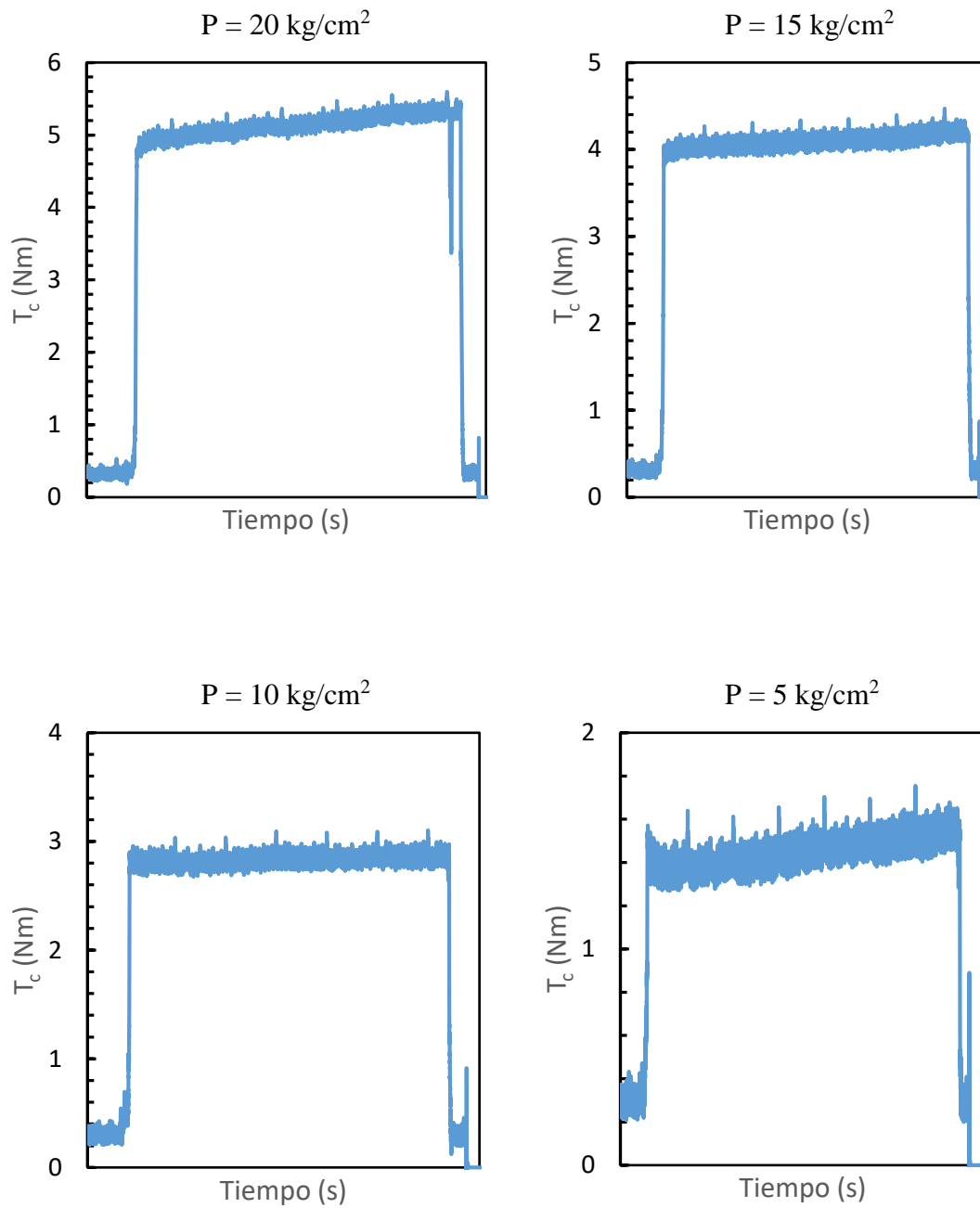
2.2. ENSAYOS “ARRASTRE”

A continuación, se adjuntan las gráficas de los resultados de los ensayos “Arrastre”, referentes al par ejercido por el eje C en todo instante durante los diferentes ensayos.

PIEZA 1

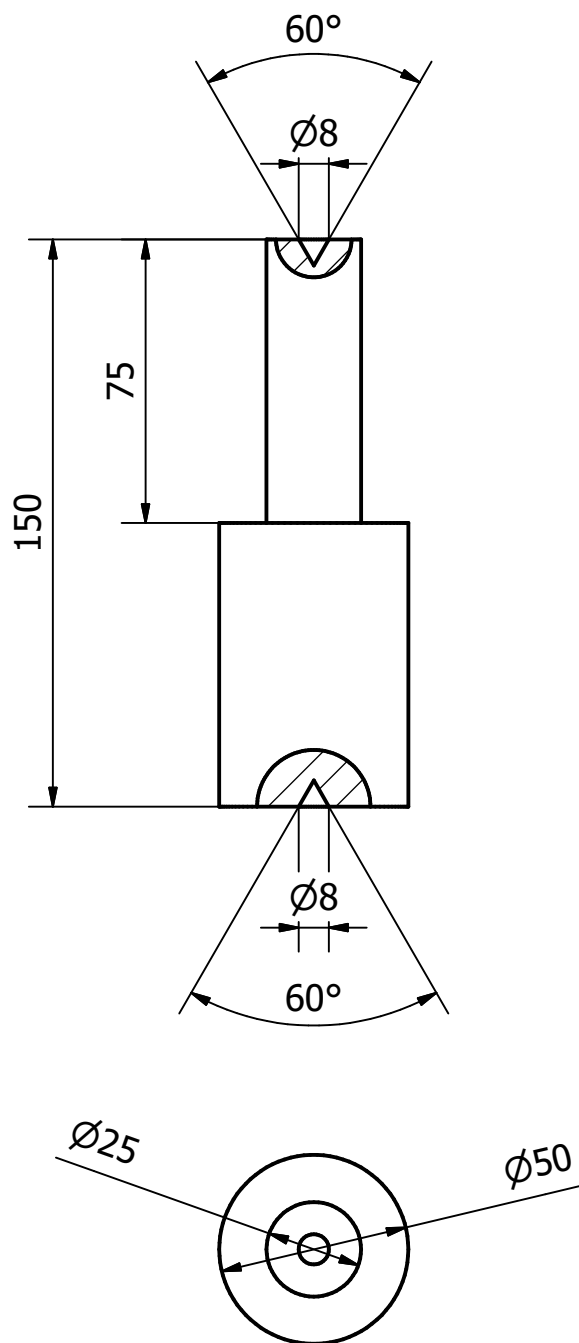


PIEZA 2



ANEXO 3 - PLANOS

En el Anexo 2 se adjunta el plano de las probetas ensayadas en la rectificadora cilíndrica.



10	Probeta de ensayos		1	F-522	1,4	14
----	--------------------	--	---	-------	-----	----

Cant./Kant.	Denominación/Izendapena	Norma/Araudia Plano/Planoa	Marca/Marka	Material/Materiala Observ./Behaketak	Unit. Peso/Pisu	Total/Osoa
-------------	-------------------------	-------------------------------	-------------	-----------------------------------------	--------------------	------------

Dibujado/Marraztuko:	Fecha/Data:	Nombre/Izena:	Firma/Signa.:
Comprob./Egiaztatu:			
Dirigido/Zuzenduta:			



UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO
EUSKAL HERRIKO UNIBETSITATEA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
INGENIARITZA MEKANIKOKO GRADUA



	Escala/Eskala: 1 : 2
--	------------------------------------

PROBETA DE ENSAYOS

ESTUDIO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE AMARRE POR FRICCIÓN EN RECTIFICADO CILÍNDRICO
Plano N°/Zkia.: 1
Plano Cant./Kop.: 1
Calificación/Kalifikazioa: