

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA REFRIGERACIÓN EN PROCESOS DE RECTIFICADO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

Alumno/Alumna: Zaldegui López, Irene

Director/Directora (1): Izquierdo Aramburu, Borja

Director/Directora (2): Godino Fernández, Leire

Curso: 2020 / 2021

Fecha: Bilbao, 30 de junio de 2021

RESUMEN

CASTELLANO

El rectificado es un proceso de mecanizado por abrasión, que suele estar situado al final de la fabricación de las piezas, aportándoles un gran valor añadido. Debido a las altas exigencias de tolerancias dimensionales y acabados superficiales, es un proceso que está en constante investigación y mejora. Uno de los tipos de rectificado más demandados en la industria, es el rectificado de caras, por ello son muchos los estudios que se centran en este tipo de rectificado y en su optimización.

Uno de los problemas más comunes en los procesos de rectificado de caras es el daño térmico, lo que puede suponer diferentes cambios en las piezas que provoquen una pérdida de sus propiedades mecánicas y su funcionalidad. Por ello, este proyecto tiene como objetivos principales realizar mediciones de temperaturas en rectificado plano, haciendo uso de una sensórica avanzada, y analizar la influencia de la refrigeración en estos procesos. Asimismo, trata de aportar una solución práctica a la medición de temperaturas en rectificado haciendo uso de fluido de corte.

La tecnología que se ha utilizado consta de dos pirómetros dicromáticos con fibra óptica, que permiten la medición de temperaturas de manera casi instantánea, las cuales además, no se ven afectadas por la emisividad del material, ni por el uso de fluido de corte, lo que proporciona grandes ventajas respecto a otros métodos de medición de temperaturas.

Dado que el fluido de corte es un elemento muy importante para evitar el daño térmico en las piezas, se ha realizado un análisis de la influencia del mismo en estos procesos. Para ello, se han realizado pruebas en seco y con fluido de corte. En estas últimas se ha usado un sistema de refrigeración convencional, con diferentes boquillas de chorro libre.

EUSKERA

Artezketa urraduraren bidez materiala kentzen duen fabrikazio-prozesua da, eta, eskuarki, piezen fabrikazioaren amaieran kokatzen da. Prozesu honetan piezen perdoi geometrikoek eta akaberek eskaera handiak dituztenez, ikerketa askok artezketa prozesuen optimizazioa eta hobekuntzak ikertzen dituzte. Industrian artezketa mota garrantzitsuenetariko bat artezketa laua da. Hau dela eta, azterlan anitzek artezketa lauan biltzen dituzte haien ikerketak.

Artezketa lauan ematen den arazo arruntenetariko bat kalte termikoa da. Arazo honek piezek propietate mekanikoak eta funtzionaltasuna galtzea eragin ahal duten hainbat aldaketa ekar ditzake. Horregatik, proiektu honen helburu nagusiak artezketa lauaren prozesuan tenperaturak neurtzea, teknologia berritzaile batekin, eta hozte-sistemaren eragina aztertzea dira. Horrez gain, artezketan prozuen tenperaturak neurtzearen konponbide bat eman nahi da.

Neurketak egiteko erabili den teknologia bi pirometroz eta zuntz optikoz osatuta dago. Honek tenperaturak ia berehala neurtzea uzten ditu eta materialaren emisibitateak, edota ebaketa fluidoak, neurketetan ez eragitea lortzen da. Azken honek, beste tenperaturak neurtzeko metedoekin konparatuz, abantaila handiak ematen ditu.

Piezen kalte termikoa saihas dadin, hozte-sistemak garrantzi handia du prozesuan; beraz, proiektu honetan artezketa lauran ebaketa fluidoaren eragina aztertu da. Horretarako, lehorrean eta hozketarekin egin dira entseguak. Azken saiakera hauek hozte-sistema konbentzionalarein egin dira, eta zurrusta askeko pita ezberdinak erabili dira.

ENGLISH

Grinding is a machining process based on the removal of material from a workpiece using a grinding wheel, and it is usually located at the final stages of the whole manufacturing. Due to the tight dimensional tolerance control, grinding processes are on constant investigation, so as to improve their performance. One of the most common grinding types in industry is the surface grinding and for this reason, there are many researches that focus on this type of grinding.

One of the most frequent limitations of surface grinding is thermal damage, which can cause different undesired changes in the workpieces, leading to the lose of their mechanical properties and functionality. Therefore, this project's main objectives are to measure temperatures in surface grinding, using specialised sensors for this application, and to study the influence of refrigeration on these processes. It also tries to provide a practical solution for the measurement of temperatures in surface grinding with cutting fluid presence.

The method used for measuring temperatures consists of two dichromatic pyrometers, with fibre optics. This construction allows almost instant temperature measurement, being these not affected by the emissivity of the workpiece material and the cutting fluid. Due to its characteristics the method used provides a great advantage over other methods to measure temperatures in surface grinding.

As the cutting fluid is an important element in the avoidance of thermal damage on workpieces, this project has carried out an analysis of the influence of the cutting fluid in these processes. To this end, dry assays and assays under the presence of cutting fluid using a conventional external fluid supply with different free-jet nozzles have been carried out.

Palabras clave

- Rectificado de caras
- Daño térmico
- Medición de temperaturas
- Influencia de la refrigeración
- Pirómetro dicromático
- Fibra óptica
- Boquillas de chorro libre

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA REFRIGERACIÓN EN PROCESOS DE RECTIFICADO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

DOCUMENTO 1- INDICE GENERAL

Alumno/Alumna: Zaldegui López, Irene

Director/Directora (1): Izquierdo Aramburu, Borja

Director/Directora (2): Godino Fernández, Leire

Curso: 2020 / 2021

Fecha: Bilbao, 30 de junio de 2021

DOCUMENTO 1: ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO 1: ÍNDICE GENERAL	5
DOCUMENTO 2: LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ECUACIONES	9
DOCUMENTO 3: MEMORIA.....	14
1. Introducción.....	18
2. Contextualización.....	19
3. Objetivos y alcance.....	20
4. Beneficios del proyecto.....	20
5. Definiciones y abreviaturas.....	22
6. Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte.....	23
6.1 Introducción al rectificado.....	23
6.1.1 Tipos de rectificado.....	23
6.1.2 Muelas abrasivas.....	25
6.2 Parámetros y variables en rectificado plano.....	26
6.2.1 Parámetros.....	27
6.2.2 Variables	27
6.3 Problemática en el rectificado.....	32
6.3.1 Causas y consecuencias del daño térmico.....	33
6.3.2 Disminución del daño térmico	34
6.3.3 Detección de daño térmico.....	35
6.4 Medición de temperaturas en procesos de rectificado	36
6.5 Métodos de medición de temperaturas	37
6.6 Pirometría.....	38
6.6.1 Radiación y emisividad.....	39
6.6.2 Pirómetro.....	41
6.7 Refrigeración en rectificado.....	43
6.7.1 Métodos convencionales de refrigeración.....	44
6.7.2 Métodos alternativos de refrigeración	45
7. Análisis de alternativas.....	46
7.1 Alternativas.....	47
7.2 Estudio de alternativas.....	48
8. Descripción de la solución propuesta sobre la medida de temperaturas en rectificado plano.....	49

9. Descripción de fases y tareas	51
9.1 Fase 1: Formación	51
9.2 Fase 2: Desarrollo del proyecto.....	52
9.3 Fase 3: Ejecución de ensayos.....	53
9.4 Fase 4: Tratamiento de datos y análisis de resultados	54
9.5 Fase 5: Redacción del proyecto	54
10. Descripción de equipos y materiales.....	55
10.1 Materiales	55
10.2 Equipos e instrumentos	58
10.2.1 Preparación de probetas.....	58
10.2.2 Ejecución de ensayos	61
10.2.3 Análisis de resultados.....	64
10.3 Descripción de los pirómetros	66
11. Descripción del procedimiento	68
11.1 Puesta a punto	69
11.1.1 Piezas.....	69
11.1.2 Diseño del proceso.....	72
11.2 Metodología seguida en los ensayos	74
11.2.1 Montaje.....	74
11.2.2 Ensayos	77
11.3 Mediciones y tratamiento de datos.....	81
11.3.1 Mediciones de piezas.....	81
11.3.2 Tratamiento de datos.....	84
11.3.3 Temperaturas	88
12. Diagrama de Gantt.....	92
13. Resultados.....	93
13.1 Resultados preliminares	93
13.2 Resultados finales.....	97
13.2.1 Definición de ensayos finales	97
13.2.2 Resultados	98
14. Aspectos económicos	111
14.1 Desglose detallado.....	111
14.1.1 Recursos humanos.....	111
14.1.2 Recursos materiales fungibles	112

14.1.3 Recursos materiales amortizables.....	112
14.1.4 Recursos informáticos amortizables.....	113
14.2 Presupuesto total de ejecución del proyecto	113
15. Conclusiones	114
16. Líneas futuras.....	115
17. Bibliografía.....	120
DOCUMENTO 4: ANEXOS.....	123

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA REFRIGERACIÓN EN PROCESOS DE RECTIFICADO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

DOCUMENTO 2- LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ECUACIONES

Alumno/Alumna: Zaldegui López, Irene

Director/Directora (1): Izquierdo Aramburu, Borja

Director/Directora (2): Godino Fernández, Leire

Curso: 2020 / 2021

Fecha: Bilbao, 30 de junio de 2021

DOCUMENTO 2: LISTA DE TABLAS, ILUSTRACIONES, Y ECUACIONES

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Definiciones y abreviaturas</i>	22
<i>Tabla 2. Tamaño de grano</i>	25
<i>Tabla 3. Dureza muelas</i>	26
<i>Tabla 4. Estructura muelas</i>	26
<i>Tabla 5. Comparación de alternativas</i>	48
<i>Tabla 6. Composición química DIN 1.2510</i>	56
<i>Tabla 7. Propiedades físicas y mecánicas del DIN 1.2510</i>	56
<i>Tabla 8. Características de la refrigeración</i>	57
<i>Tabla 9. Parámetros y variables de los ensayos preliminares</i>	72
<i>Tabla 10. Reparto de potencias y cálculo de profundidades reales de pasada</i>	86
<i>Tabla 11. Distancia del agujero a la superficie en cada pasada</i>	87
<i>Tabla 12. Calibración del módulo 1</i>	89
<i>Tabla 13. Calibración módulo 2</i>	89
<i>Tabla 14. Diagrama de Gantt</i>	92
<i>Tabla 15. Parámetros reales de los ensayos preliminares</i>	93
<i>Tabla 16. Características de la refrigeración</i>	93
<i>Tabla 17. Parámetros y variables de los ensayos finales</i>	97
<i>Tabla 18. Presupuesto de los recursos humanos</i>	111
<i>Tabla 19. Presupuesto de los recursos materiales fungibles</i>	112
<i>Tabla 20. Presupuesto de los recursos materiales amortizables</i>	112
<i>Tabla 21. Presupuesto de los recursos informáticos amortizables</i>	113

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Rectificado. Fuente: Afilasol</i>	18
<i>Ilustración 2. Logo IDEKO. Fuente: IDEKO</i>	19
<i>Ilustración 3. Logo DANOBATGROUP. Fuente: DANOBATGROUP</i>	20
<i>Ilustración 4. Tipos de rectificado plano. Fuente: UPV/EHU</i>	23
<i>Ilustración 5. Tipos de rectificado cilíndrico. Fuente: UPV/EHU</i>	24
<i>Ilustración 6. Rectificado sin centros. Fuente: INSENA</i>	24
<i>Ilustración 7. Parámetros del rectificado plano</i>	27
<i>Ilustración 8. Porcentajes de evacuación de calor. Fuente: UPV/EHU</i>	30
<i>Ilustración 9. Fuerzas en rectificado. Fuente: UPV/EHU</i>	31
<i>Ilustración 10. Vibraciones. Fuente: UPV/EHU</i>	32
<i>Ilustración 11. Pieza decolorada. Fuente: UPV/EHU</i>	33
<i>Ilustración 12. Grietas en piezas por tensiones residuales</i>	34
<i>Ilustración 13. Cambios en la estructura del material. Fuente: UPV/EHU</i>	34
<i>Ilustración 14. Prueba de baño en ácido. Fuente: Power transmission world</i>	36
<i>Ilustración 15. Esquema termopares. Fuente: LOGICBUS</i>	37
<i>Ilustración 16. Cámara termográfica en mecanizado. Fuente: GRUPO ALAVA</i>	38

<i>Ilustración 17. Conjunto de curvas de radiación a distintas temperaturas. Fuente: TEC-SCIENCE</i>	39
<i>Ilustración 18. Esquema emisividad de un cuerpo. Fuente: UPV/EHU</i>	40
<i>Ilustración 19. Esquema emisividad de un cuerpo negro. Fuente: UPV/EHU</i>	40
<i>Ilustración 20. Respuesta espectral de las dos células fotosensibles de un fotodiodo de dos colores. Fuente: [19]</i>	42
<i>Ilustración 21. Clasificación de los métodos de refrigeración. Fuente: [22]</i>	43
<i>Ilustración 22. Boquillas de chorro libre. Fuente: Componentes del aire</i>	44
<i>Ilustración 23. Boquillas de zapata. Fuente: [23]</i>	45
<i>Ilustración 24. Muelas con ranuras para la refrigeración. Fuente [27]</i>	46
<i>Ilustración 25. Refrigeración interna. Fuente [28]</i>	46
<i>Ilustración 26. Esquema de la medición de temperaturas con fibra óptica. Fuente [19]</i>	50
<i>Ilustración 27. Esquema de refrigeración convencional. Fuente: [24]</i>	51
<i>Ilustración 28. Pieza</i>	55
<i>Ilustración 29. Dimensiones piezas</i>	55
<i>Ilustración 30. Muela</i>	56
<i>Ilustración 31. Manguera de refrigeración y boquilla de sección circular</i>	57
<i>Ilustración 32. Boquilla de sección rectangular</i>	57
<i>Ilustración 33. Diamantador</i>	58
<i>Ilustración 34. Máquina de electroerosión por penetración ONA CS300</i>	59
<i>Ilustración 35. Porta electrodos con electrodo de 1mm</i>	59
<i>Ilustración 36. Durómetro</i>	60
<i>Ilustración 37. Líquido desoxidante. Fuente: TITAN</i>	60
<i>Ilustración 38. Multímetro. Fuente: Xindar</i>	61
<i>Ilustración 39. Rectificadora plana BLOHM ORBIT 36</i>	61
<i>Ilustración 40. Reloj comparador. Fuente: Mitutoyo</i>	62
<i>Ilustración 41. Medidor de potencia</i>	62
<i>Ilustración 42. Tarjeta de adquisición de datos USB-6008(National Instruments)</i>	63
<i>Ilustración 43. Mesa dinamométrica KISTLER</i>	63
<i>Ilustración 44. Mordaza. Fuente: Fervi</i>	64
<i>Ilustración 45. Calzos</i>	64
<i>Ilustración 46. Máquina de electroerosión por hilo</i>	65
<i>Ilustración 47. Microscopio Leica</i>	66
<i>Ilustración 48. Sistema de medición de temperaturas</i>	67
<i>Ilustración 49. Conector fibra óptica. Fuente: Fibra de hoy</i>	68
<i>Ilustración 50. Pasos del proceso de electroerosión por penetración</i>	70
<i>Ilustración 51. Proceso de electroerosión por penetración</i>	70
<i>Ilustración 52. Clasificación de agujeros</i>	71
<i>Ilustración 53. Medición de la altura de la pieza</i>	71
<i>Ilustración 54. Esquema de las condiciones de refrigeración</i>	73
<i>Ilustración 55. Configuración Down Grinding</i>	73
<i>Ilustración 56. Conexiones de los pirómetros</i>	74
<i>Ilustración 57. Herramientas para la conservación de las fibras ópticas</i>	75
<i>Ilustración 58. Montaje de fibras y pieza</i>	76

<i>Ilustración 59. Montaje</i>	77
<i>Ilustración 60. Planeado de la pieza</i>	78
<i>Ilustración 61. Desbaste con escalón</i>	78
<i>Ilustración 62. Ejecución del ensayo</i>	79
<i>Ilustración 63. Boquillas bien posicionadas</i>	80
<i>Ilustración 64. Boquilla mal posicionada</i>	80
<i>Ilustración 65. Ejecución de ensayos en seco y con taladrina</i>	81
<i>Ilustración 66. Corte por electroerosión con hilo</i>	82
<i>Ilustración 67. Agujero descubierto por rectificado</i>	83
<i>Ilustración 68. Piezas cortadas y rectificadas</i>	83
<i>Ilustración 69. Medición con microscopio</i>	84
<i>Ilustración 70. Foto y distancia con microscopio</i>	84
<i>Ilustración 71. Filtrado de potencia con SW Great</i>	85
<i>Ilustración 72. Filtrado de fuerzas con SW Great</i>	88
<i>Ilustración 73. Calibración de los módulos</i>	90
<i>Ilustración 74. Gráficas de temperaturas de ensayos preliminares</i>	91
<i>Ilustración 75. Gráfica de potencias de ensayos preliminares</i>	94
<i>Ilustración 76. Resultados de fuerzas de los ensayos preliminares</i>	95
<i>Ilustración 77. Temperaturas de los ensayos preliminares</i>	96
<i>Ilustración 78. Potencias ensayos finales tipo 1</i>	98
<i>Ilustración 79. Potencias ensayos finales tipo 2</i>	99
<i>Ilustración 80. Potencias ensayos finales tipo 3</i>	100
<i>Ilustración 81. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 1</i>	101
<i>Ilustración 82. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 2</i>	102
<i>Ilustración 83. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 3</i>	103
<i>Ilustración 84. Temperaturas ensayos finales tipo 1</i>	104
<i>Ilustración 85. Temperaturas ensayos finales tipo 2</i>	105
<i>Ilustración 86. Temperaturas ensayos finales tipo 3</i>	106
<i>Ilustración 87. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (I)</i>	107
<i>Ilustración 88. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (II)</i>	108
<i>Ilustración 89. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (III)</i>	108
<i>Ilustración 90. Estado de las piezas ensayos finales tipo 2</i>	109
<i>Ilustración 91. Estado de las piezas ensayos finales tipo 3</i>	110
<i>Ilustración 92. Gradiente de temperaturas en la pieza con agujero</i>	116
<i>Ilustración 93. Datos de la simulación cinemática</i>	116
<i>Ilustración 94. Simulación térmica SimRect</i>	117
<i>Ilustración 95. Datos de las cavidades en la simulación térmica</i>	117
<i>Ilustración 96. Simulación de temperaturas</i>	118
<i>Ilustración 97. Boquillas</i>	118

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Caudal de viruta</i>	28
<i>Ecuación 2. Caudal específico de viruta</i>	28
<i>Ecuación 3. Ratio de velocidades</i>	28

<i>Ecuación 4. Energía específica</i>	29
<i>Ecuación 5. Evacuación total de calor</i>	30
<i>Ecuación 6. Evacuación de calor con fracciones</i>	30
<i>Ecuación 7. Potencia</i>	31
<i>Ecuación 8. Coeficiente de rozamiento</i>	31
<i>Ecuación 9. Emisividad</i>	40
<i>Ecuación 10. Caudal</i>	45

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA REFRIGERACIÓN EN PROCESOS DE RECTIFICADO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

DOCUMENTO 3- MEMORIA

Alumno/Alumna: Zaldegui López, Irene

Director/Directora (1): Izquierdo Aramburu, Borja

Director/Directora (2): Godino Fernández, Leire

Curso: 2020 / 2021

Fecha: Bilbao, 30 de junio de 2021

DOCUMENTO 3: MEMORIA

1. Introducción.....	18
2. Contextualización	19
3. Objetivos y alcance.....	20
4. Beneficios del proyecto.....	20
5. Definiciones y abreviaturas.....	22
6. Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte	23
6.1 Introducción al rectificado.....	23
6.1.1 Tipos de rectificado.....	23
6.1.2 Muelas abrasivas.....	25
6.2 Parámetros y variables en rectificado plano.....	26
6.2.1 Parámetros.....	27
6.2.2 Variables	27
6.3 Problemática en el rectificado.....	32
6.3.1 Causas y consecuencias del daño térmico.....	33
6.3.2 Disminución del daño térmico	34
6.3.3 Detección de daño térmico.....	35
6.4 Medición de temperaturas en procesos de rectificado	36
6.5 Métodos de medición de temperaturas	37
6.6 Pirometría.....	38
6.6.1 Radiación y emisividad.....	39
6.6.2 Pirómetro	41
6.7 Refrigeración en rectificado	43
6.7.1 Métodos convencionales de refrigeración.....	44
6.7.2 Métodos alternativos de refrigeración	45
7. Análisis de alternativas.....	46
7.1 Alternativas.....	47
7.2 Estudio de alternativas.....	48
8. Descripción de la solución propuesta sobre la medida de temperaturas en rectificado plano.....	49
9. Descripción de fases y tareas	51
9.1 Fase 1: Formación	51
9.2 Fase 2: Desarrollo del proyecto.....	52

9.3 Fase 3: Ejecución de ensayos.....	53
9.4 Fase 4: Tratamiento de datos y análisis de resultados	54
9.5 Fase 5: Redacción del proyecto	54
10. Descripción de equipos y materiales.....	55
10.1 Materiales	55
10.2 Equipos e instrumentos	58
10.2.1 Preparación de probetas.....	58
10.2.2 Ejecución de ensayos	61
10.2.3 Análisis de resultados.....	64
10.3 Descripción de los pirómetros	66
11. Descripción del procedimiento	68
11.1 Puesta a punto	69
11.1.1 Piezas.....	69
11.1.2 Diseño del proceso.....	72
11.2 Metodología seguida en los ensayos	74
11.2.1 Montaje.....	74
11.2.2 Ensayos	77
11.3 Mediciones y tratamiento de datos.....	81
11.3.1 Mediciones de piezas.....	81
11.3.2 Tratamiento de datos.....	84
11.3.3 Temperaturas	88
12. Diagrama de Gantt.....	92
13. Resultados.....	93
13.1 Resultados preliminares	93
13.2 Resultados finales.....	97
13.2.1 Definición de ensayos finales	97
13.2.2 Resultados	98
14. Aspectos económicos	111
14.1 Desglose detallado.....	111
14.1.1 Recursos humanos.....	111
14.1.2 Recursos materiales fungibles	112
14.1.3 Recursos materiales amortizables.....	112
14.1.4 Recursos informáticos amortizables.....	113
14.2 Presupuesto total de ejecución del proyecto	113

15. Conclusiones	114
16. Líneas futuras.....	115
17. Bibliografía.....	120

1. Introducción

El rectificado es un proceso de mecanizado en el cual se elimina material por abrasión. Es un proceso que se lleva a cabo en una rectificadora y las herramientas abrasivas empleadas en los procesos de rectificadas son conocidas como muelas. Es habitualmente un proceso de acabado de piezas, por lo que se realiza en la etapa final de fabricación, con el fin de mejorar las tolerancias dimensionales y el acabado superficial de los productos. Las piezas en las que se lleva a cabo un rectificado son piezas que exigen buenos acabados superficiales y tolerancias geométricas exigentes.



Ilustración 1. Rectificado. Fuente: Afilasol

Hoy en día, el rectificado es un proceso de mecanizado que está presente en diferentes industrias tales como la industria automotriz, aeronáutica, aeroespacial, ferroviaria, energética... Por ello, es un procedimiento que tiene un peso relevante en la industria y muchos proyectos están orientados a su optimización. Para optimizar los procesos de rectificado se analizan los diferentes problemas que suelen aparecer en estas operaciones. Debido a la naturaleza abrasiva de este proceso, un inconveniente habitual es la aparición de quemado en las piezas.

Este estudio trata sobre la investigación de la metodología de medición de temperaturas en procesos de rectificado y el análisis de la influencia de las condiciones de refrigeración en los mismos.

La medición de temperaturas en este procedimiento de mecanizado lleva siendo objeto de estudio durante años, debido a los distintos problemas que pueden causar las altas temperaturas, los cuales se expondrán más adelante en este documento. Como es un proceso generalmente de acabado y que añade un valor importante a las piezas, es fundamental tratar de evitar temperaturas altos durante el rectificado, y así evitar el daño térmico que se puede producir, a la vez que se optimiza el proceso.

Con el fin de mejorar esta problemática en la industria se usan diferentes métodos de refrigeración en los procesos de rectificado, lo cual es fundamental para evitar el quemado de las piezas.

En resumen, este proyecto trata de realizar un estudio de la medición de temperaturas en procesos de rectificado, mediante el uso de una sensórica avanzada y especializada, más concretamente utilizando pirómetros de dos colores y fibra óptica, para variar condiciones de refrigeración y comprobar así la forma en la que estos afectan al proceso.

2. Contextualización

Este proyecto se va a desarrollar en la Universidad del País Vasco en cooperación educativa con la empresa IDEKO. IDEKO es un centro tecnológico especializado en fabricación industrial avanzada y está situado en el polígono industrial de Arriaga, en el municipio de Elgoibar.



Ilustración 2. Logo IDEKO. Fuente: IDEKO

Esta empresa se dedica a generar, captar y desarrollar nuevas tecnologías capaces de dar respuestas a los retos actuales y futuros de la industria. La actividad de IDEKO se especializa en las tecnologías de fabricación, por ello ofrecen soluciones avanzadas para mejorar las capacidades de producción y competitividad de sus clientes en sectores como máquina herramienta, ferrocarril, aeronáutica, bienes de equipo, automoción y energía, entre otros.

La organización de IDEKO se divide en tres departamentos principales y la dirección general. Los departamentos son los siguientes:

- Departamento de investigación y desarrollo: Donde se encuentran los grupos principales de investigación, y están divididos en dinámica y control, diseño e ingeniería de precisión, TICs y automatización y procesos de fabricación.
- Departamento de innovación y explotación tecnológica: Donde se analizan las necesidades actuales y futuras, se identifican las oportunidades. Y se transforman en valor.
- Departamento de organización y desarrollo: En el cual se hace la gestión, se captan y generan los talentos, se realiza el desarrollo profesional y los planes de formación, y se engloba el soporte administrativo.

Dentro del primer departamento, el de investigación y desarrollo, y más concretamente dentro del grupo de procesos de fabricación se encuentra el Digital Grinding Innovation Hub. En este centro tecnológico se centran en el desarrollo de tecnologías digitales y soluciones de rectificado de elevada precisión. El Digital Grinding Innovation Hub trabaja en cooperación la Universidad del País Vasco para desarrollar proyectos como el que sigue.

Por último, es necesario destacar para describir el entorno del proyecto que IDEKO forma parte del grupo DANOBATGROUP, donde se desarrollan y fabrican máquinas herramienta, líneas llave en mano y soluciones para aplicaciones concretas dentro del sector de la alta tecnología.



Ilustración 3. Logo DANOBATGROUP. Fuente: DANOBATGROUP

3. Objetivos y alcance

Este estudio tiene como principal objetivo analizar la viabilidad de realizar mediciones de temperaturas en rectificado plano, mediante el uso de pirómetros, y así presentar una solución a la medida de temperaturas en estos procesos.

Con el fin de alcanzar este objetivo será necesario llegar a unos objetivos previos, los cuales serán imprescindibles en el desarrollo del proyecto. Estos objetivos son los que siguen:

- Realizar un análisis del estado del arte, con el fin de reunir información recogida en textos acerca de la medida de temperaturas en rectificado y así poder tener un punto de partida del proyecto.
- Determinar las condiciones en las que se harán las mediciones y el equipo necesario para la realización de estas.
- Preparar las probetas de manera óptima para una medición de temperaturas precisa.
- Fijar unos ensayos preliminares para la obtención de temperatura.
- Analizar los resultados con el propósito de validar esta metodología para la medida de temperaturas en rectificado plano.

Una vez verificado el sistema de evaluación y adquisición de temperaturas, este proyecto tiene como objetivo final la variación de las condiciones de refrigeración en diferentes ensayos, para ver la influencia de estos cambios en las lecturas de temperaturas y así optimizar el proceso.

4. Beneficios del proyecto

Como ya se ha subrayado anteriormente la medida de temperaturas en rectificado es una cuestión que lleva años siendo estudiada, debido a los problemas que las altas temperaturas ocasionan en estos procesos. Por eso uno de los principales beneficios de este estudio es poder validar una metodología para obtener mediciones de temperaturas en rectificado. Esto es de gran provecho ya que tener controladas las temperaturas que se alcanzan en cada proceso puede ayudar a optimizar los procesos, ajustando los parámetros adecuadamente, y evitar el daño térmico.

Además, este proyecto permite obtener datos reales de temperaturas, mediante la realización de ensayos, de tal forma que se pueda observar, desde un punto de vista térmico, la influencia de cada parámetro en los procesos de rectificado. Esto proporciona un buen ajuste de los parámetros a cada proceso y una buena optimización del mismo, aumentando así la eficiencia.

Por último, es necesario destacar que la técnica de medición de temperaturas permite también optimizar las características de la refrigeración, haciendo que la aportación del fluido de corte se ajuste de la forma más adecuada a cada proceso.

5. Definiciones y abreviaturas

En este apartado se especifican los elementos que se mencionan a lo largo del documento, con su correspondiente definición y abreviatura.

Tabla 1. Definiciones y abreviaturas

Abreviatura	Definición	Unidad
a_e	Profundidad de pasada	[mm]
b_w	Ancho de pasada	[mm]
CBN	Nitruro de boro cúbico	-
e_c	Energía específica	[J/mm ³]
ε	Emisividad	-
μ	Coefficiente de rozamiento	-
F_a	Fuerza axial	[N]
F_n	Fuerza normal	[N]
F_t	Fuerza tangencial	[N]
P	Potencia	[W]
Q_w	Caudal de viruta	[mm ³ /s]
Q_w'	Caudal específico de viruta	[mm ³ /mm·s]
q_{ch}	Calor evacuado por la viruta	[J]
q_f	Calor evacuado por el fluido	[J]
q_s	Ratio de velocidades	-
q_m	Calor evacuado por la muela	[J]
q_t	Calor evacuado total	[J]
q_w	Calor evacuado por la pieza	[J]
R_i	Fracción de calor	-
R_{ch}	Fracción de calor evacuada por la viruta	-
R_f	Fracción de calor evacuada por el fluido	-
R_m	Fracción de calor evacuada por la muela	-
R_w	Fracción de calor evacuada por la pieza	-
v_s	Velocidad de corte (muela)	[m/s]
v_w	Velocidad de avance	[mm/min]

6. Revisión bibliográfica y análisis del estado del arte

En este apartado se explicarán los contenidos teóricos más importantes para el desarrollo de este estudio.

6.1 Introducción al rectificado

El proceso de rectificado es una técnica de mecanizado que elimina material de una pieza mediante la abrasión. Es un proceso que habitualmente se sitúa al final del proceso de fabricación de las piezas, y que tiene como objetivo la corrección de defectos, garantizando buenos acabados dimensionales y superficiales de las piezas.

Por medio de la abrasión se logran unas tolerancias geométricas del orden de micras y el material se desprende en forma de pequeñas partículas a una elevada temperatura. Es por esto que el rectificado es un proceso que se aplica en sectores donde las piezas requieren medidas y tolerancias exigentes, ya sean geométricas, dimensionales o de acabado superficial.

6.1.1 Tipos de rectificado

En función del tipo de pieza y de la cinemática del proceso, se pueden distinguir distintos tipos de rectificado.

- **Rectificado plano:** se usa para rectificar caras planas, ranuras y perfiles. Dentro de esta clase de rectificado se pueden diferenciar dos variedades. Por una parte se encuentra rectificado plano frontal (*Ilustración 4b*), en el cual el eje de la herramienta se sitúa perpendicularmente a la pieza, por otra parte está el rectificado plano tangencial (*Ilustración 4a*), en el que el eje de la herramienta es paralelo a la superficie a rectificar. Habitualmente las piezas se agarran a la máquina mediante una mesa magnética, sin embargo, si esta solución no es suficiente, hay diferentes alternativas, como una mordaza.

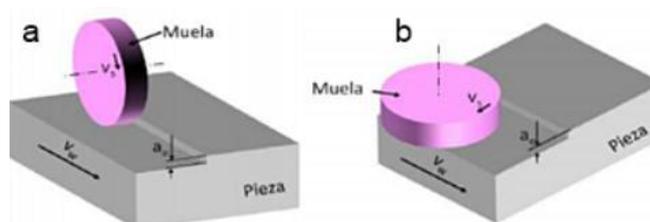


Ilustración 4. Tipos de rectificado plano. Fuente: UPV/EHU

- **Rectificado cilíndrico:** se emplea en el rectificado de piezas cilíndricas, las cuales, a diferencia del rectificado plano, giran. El más común es el rectificado cilíndrico exterior (*Ilustración 5a*), donde se rectifica el diámetro de la pieza hasta llegar a las características exigidas. También está el rectificado cilíndrico interior (*Ilustración 5b*), para perfeccionar las superficies funcionales interiores.

Para amarrar las piezas en el rectificado cilíndrico se emplea un punto y un contrapunto, de forma que la pieza gire alineada con su eje de revolución. Los parámetros más importantes son los siguientes: Velocidad de penetración, velocidad de pieza, velocidad de corte y anchura de pasada.

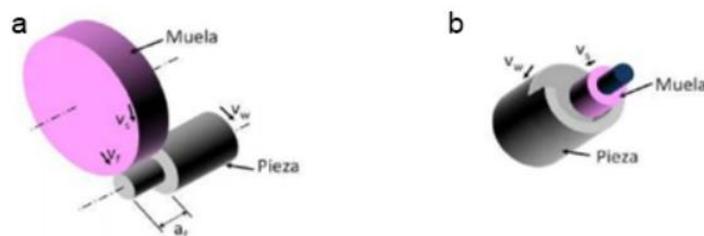


Ilustración 5. Tipos de rectificado cilíndrico. Fuente: UPV/EHU

- **Rectificado sin centros:** este tipo de rectificado se lleva a cabo sobre una pieza cilíndrica. La pieza es procesada sin que haya nada que la amarre, ya que está entre dos muelas que a la vez que giran son presionadas entre ellas, tal y como se observa en la *Ilustración 6. Rectificado sin centros. Fuente: INSENA*. Adicionalmente se puede colocar un tercer apoyo debajo de la pieza, el cual es una regla planificada con muy buen acabado. Este tipo de rectificadores es exclusivamente para rectificar el diámetro exterior de las piezas, pero proporciona una redondez y unas tolerancias de gran calidad.

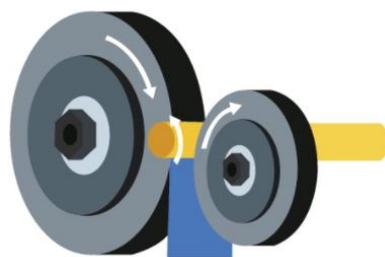


Ilustración 6. Rectificado sin centros. Fuente: INSENA

6.1.2 Muelas abrasivas

La herramienta abrasiva empleada en los procesos de rectificado se denomina muela, la cual está compuesta por granos de material abrasivo y aglomerante. Las muelas no son del todo compactas, tienen espacio entre los granos y el aglomerante. Estas herramientas tienen diferentes características que hacen que cada muela sea más adecuada para una aplicación en concreto.

A pesar de que la denominación de muelas abrasivas no está normalizada y depende de cada fabricante las nomenclaturas habituales tienen las siguientes características: \emptyset muela x anchura x \emptyset agujero / Tipo de abrasivo / Tamaño de grano / Grado de dureza / Estructura / Aglomerante.

Las características más destacables son las siguientes:

- **Abrasivo:** Según el tipo de abrasivo se diferencian dos grupos: muelas de convencionales y muelas de superabrasivo.
Las muelas convencionales están compuestas por óxido de aluminio, comúnmente conocido como alúmina, o por carburo de silicio. Son las muelas más comunes en la industria y se suelen usar para el rectificado de aceros y aleaciones.
Las muelas de superabrasivo pueden ser de distintos materiales, como por ejemplo de nitruro de boro cúbico, también llamado CBN, que se emplea para el rectificado a alta velocidad de materiales férricos con dureza alta, aleaciones termo-resistentes y herramientas de corte. También hay muelas de diamante para el rectificado con alta velocidad y precisión de cerámicas y metal duro.
- **Tamaño de grano:** determinante en el acabado superficial que se desea obtener en la pieza. Para operaciones de desbaste se emplea un tamaño de grano más grosero y para acabado fino.

Tabla 2. Tamaño de grano

Tamaño de grano	Acabado superficial
4, 6, 8, 10	Muy grosero
12, 14, 16, 20, 24	Grosero
30, 36, 46, 54, 60	Medio
70, 80, 90, 100, 120, 150	Fino
180, 220, 240, 280, 320, 400, 500, 600	Muy fino

- **Dureza:** hace referencia a la resistencia de la muela y la fuerza con la que el aglomerante sujeta los granos. Esta característica se indica con letras. Conforme la muela es más dura la letra correspondiente estará más avanzada en el abecedario.

Tabla 3. Dureza muelas

Grado de dureza	Característica
A-E	Muelas muy blandas
F-K	Muelas blandas
L-Q	Muelas de dureza media
R-T	Muelas duras
U-Z	Muelas muy duras

- Estructura de la muela: es la distancia entre granos, dentro de una escala específica. Controla la cantidad de grano abrasivo por unidad de volumen de la muela. Las muelas que tienen más separación se emplean para materiales blandos y dúctiles, las que tienen menos separación para materiales más frágiles.

Tabla 4. Estructura muelas

Grado	Tipo de muela	Espacio de granos
1-4	Densa	Cerrado
5-7	Normal	Medio
8-11	Abierta	Separado
12-14	Muy abierta	Muy separado

- Aglomerante: es el material que une los granos abrasivos de la muela. Dependiendo del tipo de aglomerante empleado se pueden diferenciar tres diferentes:
 - Vítreo (V): Este tipo de aglomerante se caracteriza por ser frágil y rígido, con una porosidad controlable, insensible a las altas temperaturas y ataques químicos.
 - Resinoso (R): Es un aglomerante dúctil, con baja porosidad y no apto para temperaturas altas.
 - Metálico: Este material tiene una elevada retención de grano, sin porosidad y indicado para emplearse en superabrasivos.

La muela elegida para realizar este trabajo es una muela convencional de alúmina. Se va a usar este tipo de muela porque son las más usadas en la industria y la elección de la herramienta no es objeto de estudio de este proyecto.

6.2 Parámetros y variables en rectificado plano

A pesar de existir diferentes tipos de rectificado, y que así se haya descrito anteriormente, este proyecto se centra en el rectificado plano. Esto se debe a que este análisis del estado del arte está dirigido a un proyecto que se va a desarrollar en estas condiciones.

6.2.1 Parámetros

En el ámbito del rectificado plano existen diferentes parámetros que definen el proceso, y son los que siguen:

- Profundidad de pasada (a_e): Es el espesor de material que arranca la muela en cada una de las pasadas, es decir, la profundidad de pieza que elimina en una pasada. Es un parámetro que suele variar, dependiendo el tipo de rectificado que se haga. Por ejemplo, en un rectificado convencional la a_e puede ser del orden de micras y, sin embargo, en un rectificado de alto rendimiento las profundidades de pasada están en torno a 1mm.
- Velocidad de corte (v_s): Es la velocidad de giro de la muela, y se suele medir en m/s. Las muelas convencionales suelen girar a una velocidad máxima de 30 m/s, mientras que las muelas de superabrasivo pueden llegar a girar a 120 m/s.
- Velocidad de avance (v_w): Esta velocidad corresponde a la mesa de la máquina, es decir, es la velocidad a la que avanza la pieza para realizar la pasada. No hay una velocidad fija para cada caso, ya que es un parámetro que varía mucho según el proceso.
- Ancho de pasada (b_w): Es la anchura que quita la muela en cada pasada. Si la superficie a rectificar es mayor que el ancho de la muela, b_w coincide con el ancho de la muela, tal y como pasa en la *Ilustración 7*. Si por el contrario, la superficie que se rectifica es menor que el ancho de la muela, es decir, que no todo el contorno de la muela toca superficie en las pasadas, el b_w será la anchura de la pieza.

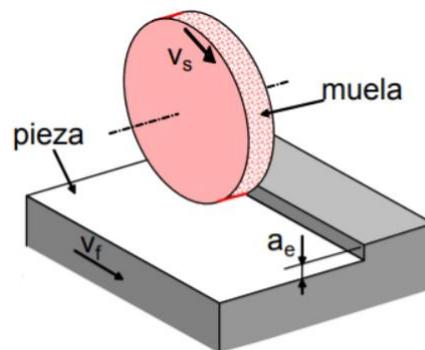


Ilustración 7. Parámetros del rectificado plano

6.2.2 Variables

Además de los parámetros mencionados, también es importante tener en cuenta las diferentes variables del proceso.

Caudal de viruta (Q_w)

El caudal de viruta es el volumen de material que se arranca durante el proceso por unidad de tiempo. Es una variable que, como se ve en la *Ecuación 1*, está directamente relacionada con la velocidad de avance, la profundidad de pasada y el ancho de pasada.

$$Q_w = \frac{V_w \cdot a_e \cdot b_w}{60} = Q_w' \cdot b_w$$

Ecuación 1. Caudal de viruta

Generalmente, en los procesos se habla de caudal específico de viruta (Q_w'), que determina el volumen de material arrancado en un segundo por anchura de pasada. En términos generales, se suele usar este parámetro para poder comparar procesos.

$$Q_w' = \frac{V_w \cdot a_e}{60}$$

Ecuación 2. Caudal específico de viruta

El Q_w' se encuentra en torno a $1.5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ en las operaciones de acabado, $5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ en las de desbaste y si supera un valor de $10 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ se considera que el rectificado es de alto rendimiento.

Ratio de velocidades (q_s)

Es una variable que relaciona la velocidad de corte, es decir, la velocidad periférica de la muela, y la velocidad de avance:

$$q_s = \frac{V_s}{V_w}$$

Ecuación 3. Ratio de velocidades

Para el rectificado plano los valores de q_s suelen estar entre 80 y 120 en acabado y 60 y 80 en desbaste. Cuando se supera el valor de 120 el proceso entra en zona de daño térmico, sin embargo, hay estudios donde se demuestra que cuando el q_s supera un valor de 1000 el daño térmico mejora.

Es por esto que esta variable se tiene en cuenta a la hora de diseñar procesos y definir parámetros de los mismos.

Potencia (P)

El proceso de rectificado, como todos los procesos de fabricación, supone un consumo de potencia. En los procesos de rectificado plano, cuando se habla de potencia, se hace referencia a la potencia consumida por el cabezal de la máquina, donde va colocada la muela. Esta potencia se debe al giro de la muela en vacío, es decir, al movimiento rotativo de la muela sin tener contacto con la pieza, y al proceso en sí, es decir, al corte de la superficie. Dependiendo de la máquina donde se realicen las operaciones los consumos de potencia estarán limitados.

La potencia es un buen indicador de que el proceso se está desarrollando adecuadamente y de que no hay ninguna anomalía. Es por esto que la medición de la potencia aporta mucha información y es una variable representativa del proceso. El consumo de la potencia se relaciona directamente con la fuerza tangencial, *Ecuación 7*, y con la energía específica, *Ecuación 4*.

Energía específica (e_c)

La energía específica es la energía requerida para eliminar una unidad de volumen de material de pieza. Esta variable, como se observa en la *Ecuación 4* es función de la potencia consumida y del caudal de viruta.

$$e_c = \frac{P}{Q_w}$$

Ecuación 4. Energía específica

Analizando la energía específica de corte a partir de las teorías de Kannappan y Malkin, esta se puede dividir en tres sumandos:

- Energía específica de formación de viruta: es la empleada en cizallar el material y está limitada por la energía de fusión del material rectificado y dependería fundamentalmente del material del que se tratara.
- Energía específica de rozamiento: se basa en el desgaste de la muela. Su valor nunca es constante y es directamente proporcional al desgaste del grano.
- Energía específica de deformación: Depende de los parámetros propios del proceso y es independiente del tamaño de grano de la muela y generalmente su valor es menor a medida que aumentan la velocidad de corte o la profundidad de pasada.

También es necesario destacar los medios por los que se evacua esta energía en forma de calor:

- Por la pieza que se rectifica (q_w)
- Por la viruta generada en el proceso (q_{ch})
- Por el fluido refrigerante (q_f)
- Por la muela (q_m)

Por lo que la evacuación total de energía se puede interpretar como el sumatorio de las diferentes formas de evacuación de energía:

$$q_t = q_w + q_{ch} + q_f + q_m$$

Ecuación 5. Evacuación total de calor

De estos cuatro medios los más importantes, en lo que respecta a este estudio, son el q_w y el q_f . El q_w es el responsable del aumento de temperatura en la pieza y en consecuencia del daño térmico. Entonces, si se disminuye el q_w la pieza sufrirá menos daño térmico. El q_f es la energía que se evacua por el fluido de corte. Como se quiere disminuir el q_w para garantizar la integridad de la pieza, se va a intentar aumentar q_f , para que se disipe más energía por el fluido de corte y menos energía por la pieza.

Debido a la complejidad para conocer la cantidad de calor que se disipa por cada una de los medios ya mencionados, en la actualidad la mayoría de las personas interesadas en el estudio del balance energético en rectificado se centran en estudiar la fracción evacuada por cada medio. Esta fracción de calor se muestra en la siguiente ecuación, donde los parámetros RI indican el porcentaje de calor que se evacua por cada medio respecto del total.

$$q_t = R_w \cdot q_t + R_{ch} \cdot q_t + R_f \cdot q_t + R_m \cdot q_t$$

Ecuación 6. Evacuación de calor con fracciones

El porcentaje de calor que se evacua en cada operación de rectificado varía según el proceso. Hay estudios donde se estiman los rangos de estos porcentajes, tal y como se representa en *Ilustración 8*.

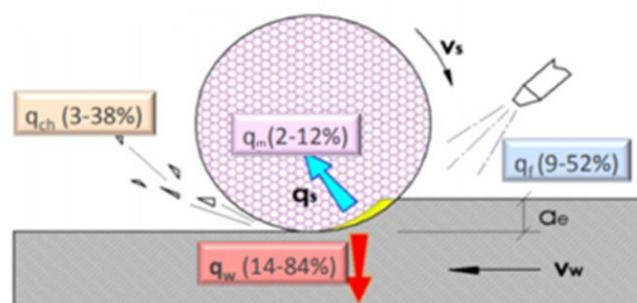


Ilustración 8. Porcentajes de evacuación de calor. Fuente: UPV/EHU

Fuerzas

En los procedimientos de rectificado se pueden destacar tres fuerzas: La fuerza tangencial, la fuerza normal y la fuerza axial. Cada una de estas fuerzas está relacionada con un eje en la máquina. En una rectificadora plana el eje Z corresponde al eje de giro de la herramienta, el eje X al movimiento de avance se la mesa y el eje Y al eje vertical.

La fuerza normal (F_n) es la responsable de las deformaciones y está relacionada con el eje Y. La fuerza tangencial (F_t) es la responsable del arranque de material, y por ello del consumo de potencia en el husillo de la máquina. Es una fuerza producida en el eje X, porque es la dirección de avance de la pieza, y se puede relacionar con la potencia usando la velocidad de giro de la muela.

$$P = F_t \cdot V_s$$

Ecuación 7. Potencia

La fuerza axial (F_a) es la encargada de la deformación lateral y se relaciona con el eje Z. En los procesos de rectificado plano es una fuerza muy inferior y es habitual no tenerla en cuenta. A diferencia que en otros procesos de mecanizado, como el fresado o el torneado, donde la fuerza tangencial es mayor, en los procesos de rectificado la fuerza normal es más elevada.

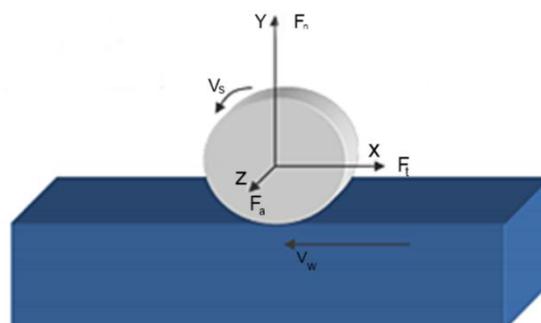


Ilustración 9. Fuerzas en rectificado. Fuente: UPV/EHU

La medición de fuerzas en rectificado proporciona información de gran utilidad, como por ejemplo la relación entre la fuerza tangencial y la normal es el coeficiente de rozamiento μ . Ecuación 8 o el cálculo de la potencia consumida a partir de la fuerza tangencial, Ecuación 7.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

Ecuación 8. Coeficiente de rozamiento

Este factor relaciona la oposición al deslizamiento que hay entre la pieza y la muela, por lo que la monitorización de las fuerzas aporta gran información en el punto de corte entre las dos superficies.

A pesar de estas ventajas, la monitorización de fuerzas en el rectificado no es una práctica muy común a nivel industrial. En cambio, en investigación es habitual realizar medidas de fuerzas mediante el uso de mesas dinamométricas.

6.3 Problemática en el rectificado

El rectificado es un proceso que se sitúa generalmente al final del mecanizado de una pieza, es decir, como último proceso de fabricación de piezas. El rectificado es un proceso de gran valor añadido y cuando las piezas pasan por este proceso ya han pasado por otros procesos antes. Debido a esto, cualquier posible defecto en la pieza al final de la fabricación puede hacer que se generen pérdidas importantes de dinero por todo el valor acumulado que tiene la pieza al llegar a esta operación.

Los defectos que pueden aparecer durante una operación de rectificado son diferentes, pero los problemas más habituales y que más daño generan en las piezas son la aparición de vibraciones y el daño térmico.

1. Las vibraciones son movimientos de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio. A veces este fenómeno se puede detectar con el giro en vacío de la muela, ya que la máquina vibra. Esto se debería a un mal equilibrado de la muela. Aun así, la forma más común de detectar las vibraciones es mediante la inspección de la superficie de la pieza rectificada, porque es habitual que la vibración resultante del proceso deje marcas que se repiten a lo largo de la superficie.

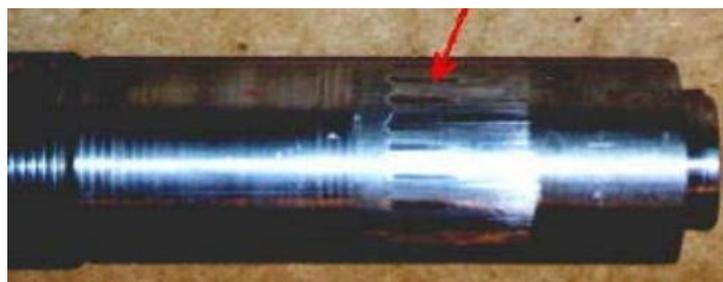


Ilustración 10. Vibraciones. Fuente: UPV/EHU

2. El daño térmico se da cuando se generan temperaturas altas en el punto de contacto. Esto se da porque parte de la energía generada se convierte en calor y esto produce variaciones en la pieza que afectan a su vida útil y a la integridad del material. Estas variaciones suelen ser: decoloración del material, cambios en la estructura interna del material y tensiones residuales. Estos problemas afectan a las propiedades mecánicas del material y hace que las piezas sean no válidas para su vida en servicio.

Sin embargo, el presente proyecto va a tratar sobre la medición de temperaturas en rectificado y sobre la refrigeración del proceso, por lo que el problema que más peso tiene para este proyecto es el daño térmico. Se ha hecho una revisión bibliográfica más extensa a cerca de esta problemática.

6.3.1 Causas y consecuencias del daño térmico

En los procesos de fabricación se crea rozamiento en el punto de contacto entre la herramienta y la pieza, y esto hace que en muchas ocasiones aparecen problemas térmicos en las piezas. En los procesos de rectificado el daño térmico es un problema muy común, y más concretamente en el rectificado de caras porque el área de contacto es mayor, lo que hace que se generen temperaturas elevadas.

En los procesos de rectificado la cantidad de energía empleada para eliminar una cantidad concreta de material es mayor que en otras operaciones de mecanizado [1]. Esto hace que la energía generada por la deformación se convierte en calor, lo que hace que la temperatura en la zona de corte sea elevada.

Sin embargo, bajo las condiciones adecuadas se puede conseguir reducir la energía específica, *Ecuación 4*, y llegar a quitar grandes cantidades de material usando altas velocidades de corte (v_s) y de avance (v_w) [2].

Está generalmente aceptado que en rectificado gran parte de la energía (65% - 80%) empleada en el proceso es transmitida a la pieza en forma de calor [3]. Debido a esta transmisión de calor la temperatura de la pieza aumenta y pueden surgir problemas tales como:

- Decoloración de la pieza: Debido a las altas temperaturas que se dan en el punto de contacto se produce una oxidación acelerada del material, lo cual hace que la superficie cambie de color. La velocidad de la oxidación dependerá de la temperatura, el fluido de corte empleado en el proceso y las propiedades del material [4].

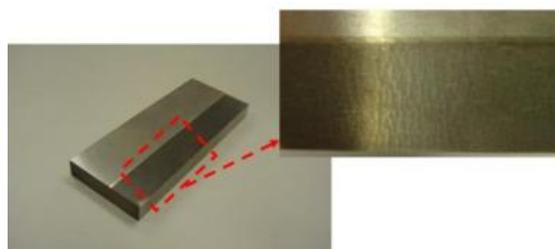


Ilustración 11. Pieza decolorada. Fuente: UPV/EHU

- Tensiones residuales: Un mayor arranque de material siempre es favorable desde el punto de vista productivo, pero esto hace que la potencia del proceso aumente y, en consecuencia, la temperatura. Las altas temperaturas generan altas tensiones residuales en la superficie de la pieza de trabajo, lo cual es perjudicial para esta. Hay tres causas principales

para la aparición de estas tensiones: expansión y contracción térmica, cambio de fases y deformación plástica. Esto hace que las piezas pierdan sus propiedades mecánicas y dejen de ser válidas. Es por ello que varias investigaciones han estudiado la influencia de la temperatura de rectificado en las tensiones superficiales [5].



Ilustración 12. Grietas en piezas por tensiones residuales

- Variaciones en la estructura interna del material: Los cambios sucesivos de temperatura pueden modificar la estructura cristalina del material que se esté rectificando. Un cambio en la estructura cristalina hace que ciertas características del material, como la resistencia al desgaste, tenacidad, maquinabilidad y dureza, se vean afectadas.

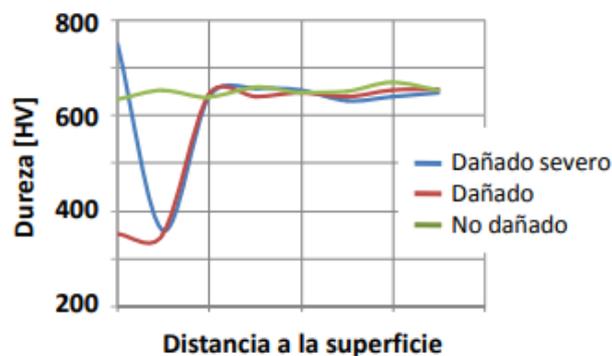


Ilustración 13. Cambios en la estructura del material. Fuente: UPV/EHU

6.3.2 Disminución del daño térmico

Como ya se ha mencionado anteriormente, el rectificado suele ser una operación para el acabado de piezas, es decir, las piezas que se rectifican han pasado por diferentes procesos antes. Por ello, es importante controlar que no haya daño térmico en ellas, ya que supone una pérdida económica considerable.

Para evitar estos problemas es necesario tener en cuenta diferentes factores. Uno de los más importantes es la refrigeración. Al igual que en otros procesos de mecanizado, en el rectificado también se emplea fluido refrigerante con el fin de aumentar la productividad del proceso y de reducir el calor que se transmite a la pieza, lubricando el punto de contacto entre la pieza y la herramienta [6]. Además, el líquido disminuye el choque térmico, ayuda a evacuar la viruta y actúa como

lubricante, facilitando el arranque del material. El fluido de corte más común es una emulsión de agua y aceite, conocido como taladrina, donde el aceite ronda el 5% de la composición. Uno de los objetivos de este proyecto es variar las condiciones de refrigeración, por lo que se más adelante se profundizará acerca de este tema.

Asimismo, es necesario controlar los parámetros del proceso con el fin de evitar problemas de carácter térmico causados por las altas temperaturas. Por ejemplo, un Q_w demasiado elevado, como puede ser superar $1,5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ en acabado, o $5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ en desbaste, puede generar temperaturas altas en la pieza. El q_s es otro parámetro importante a controlar para evitar el daño térmico, ya que al superar un valor de 120 el proceso entra en zona de daño térmico.

Hay otros aspectos que afectan a la generación de calor en la zona de contacto como puede ser el tipo de muela que se emplee durante el proceso, por ejemplo, una muela blanda producirá menos calor que una que tenga mayor dureza, y el estado de la misma. Es importante diamantar la muela para evitar un desgaste excesivo y embotamiento, es decir, que quede material adherido a la herramienta, porque aumenta la superficie de contacto y por tanto la temperatura.

6.3.3 Detección de daño térmico

Con el fin de detectar los posibles defectos causados por los cambios de temperatura en la pieza se han desarrollado diferentes métodos que se pueden clasificar en ensayos destructivos y ensayos no destructivos, según si el ensayo altera de forma permanente las propiedades de la pieza y queda inservible después de la prueba, o no.

Ensayos no destructivos

- Ruido de Barhausen: Para la medición de este método es necesario magnetizar la pieza a través de un campo magnético externo generado por un sensor. Este sensor magnetiza y desmagnetiza la muestra en un ciclo. Las características de la señal son la amplitud, el pico y la forma del ancho, lo que permite conocer cambios en el material que pueden deberse a tensiones residuales o cambios de fase [7].
- Baño ácido: Es un método que consiste en atacar a superficie que se ha rectificado con ácidos que muestran las variaciones en la estructura de la pieza. En la norma ISO-- 14104:2017 se detallan los pasos generales de la inspección por ácidos. La norma indica que en función del tono del gris de la superficie rectificada se sabrá si la pieza es ha quemado. Para ello se adjunta una escala de grises [8].

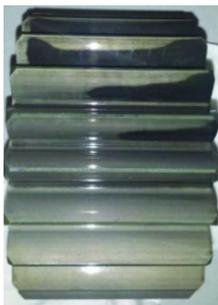


Ilustración 14. Prueba de baño en ácido. Fuente: Power transmission world

- **Corrientes inducidas:** El principio de las corrientes inducidas de Foucault se basa en la interacción entre una fuente de campo magnético alterno y el material de ensayo y en el cual se inducen corrientes. En caso de la presencia de grietas en el metal inspeccionado, se producen cambios en el flujo de la corriente que es detectado por los equipos de instrumentación [9].

Ensayos destructivos

- **Metalografía:** Consiste en estudiar la microestructura del material y así poder detectar el daño térmico. Para ello se corta la muestra que se va a analizar y se prepara mediante un desbaste y un pulido. Después se ataca químicamente con un líquido, generalmente ácido nítrico, y por último se observa la muestra con un microscopio óptico.
Es un ensayo que proporciona mucha información y muy detallada, pero que requiere tiempo y altera la muestra, por lo que queda inservible.

A nivel industrial los métodos más usados suelen ser los no destructivos, de tal forma que la pieza en la que se realizan no se ve afectada y puede cumplir con su función después de la prueba. Dentro de este grupo de ensayos son varios los métodos presentes en la industria para la detección del daño térmico. Los más comunes suelen ser el baño ácido y corrientes inducidas, ya que son pruebas sencillas que permiten determinar el daño térmico en las piezas rectificadas.

6.4 Medición de temperaturas en procesos de rectificado

Debido a los diferentes problemas que generan las altas temperaturas en los procesos de rectificado y que se han explicado anteriormente, evitar el daño térmico es indispensable para que las piezas tengan unas propiedades mecánicas adecuadas y se optimice el proceso.

A lo largo de los años muchos autores han tratado de realizar la modelización de la temperatura en rectificado [10,11]. Pero esta modelización es complicada y depende de muchas variables y simplificaciones que hacen que se pierda precisión. También se ha realizado el estudio de distribución de la temperatura en

la zona de contacto mediante el uso de elementos finitos [12] y es habitual el ajuste de los modelos térmicos en rectificado. El modelo térmico para el rectificado esta normalmente basado en considerar el efecto de la muela como una fuente de calor moviéndose sobre la superficie de la pieza de trabajo a la velocidad de avance (v_w). El valor y la distribución de dicha fuente de calor deben estar correctamente definidos según los parámetros del proceso [13].

Sin embargo, el reto de mayor dificultad consiste en la medición de la temperatura durante el proceso de rectificado. Esto es un verdadero desafío, ya que el área de contacto no tiene fácil acceso y los altos gradientes de temperatura no pueden ser medidos con algunos sensores [13]. El uso de fluido de corte también limita mucho el equipo que se puede usar y hace que la aproximación al punto de contacto sea más difícil.

Este estudio se centra en la medición de temperaturas en procesos de rectificado haciendo uso de pirómetros de dos colores, sin embargo, se van a describir diferentes metodologías para la medición de temperaturas.

6.5 Métodos de medición de temperaturas

Los métodos de medición de temperaturas se suelen clasificar en: métodos que necesitan contacto para realizar la medición y métodos sin contacto.

Con contacto:

- **Termopares:** Los termopares se pueden describir como dos hilos metálicos que se unen o se enlazan en un extremo. Esta unión se conoce como junta caliente y es el punto de medición. El otro extremo, el denominado punta fría, es el que está a temperatura ambiente. El termopar mide la diferencia de tensión entre estos dos extremos, que es proporcional a una diferencia de temperaturas. Para saber la temperatura absoluta es necesario hacer la compensación de la junta fría, es decir, añadirle la temperatura ambiente [14].

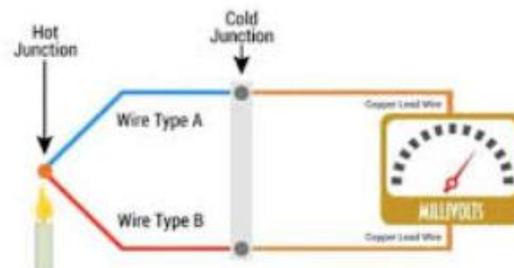


Ilustración 15. Esquema termopares. Fuente: LOGICBUS

Este sistema de medición suele ser el más usado, pero la necesidad de que haya contacto entre la punta del termopar y la pieza hace que la medición dependa mucho de la calidad del contacto. Otra de las limitaciones es el comportamiento de los termopares frente al fluido de corte y viruta generada durante el proceso.

Sin contacto:

- **Cámaras termográficas:** Este tipo de cámaras son dispositivos que miden la temperatura sin necesidad de estar en contacto con la pieza. Para medir la temperatura estas cámaras detectan la energía infrarroja emitida, transmitida o reflejada por todos los materiales a temperaturas superiores al cero absoluto [15].

A pesar de que las cámaras termográficas no requieran de contacto una gran limitación es que durante los procesos de rectificado el punto de corte tiene difícil acceso y el fluido de corte impide que la cámara capte el punto de contacto entre la muela y la pieza.

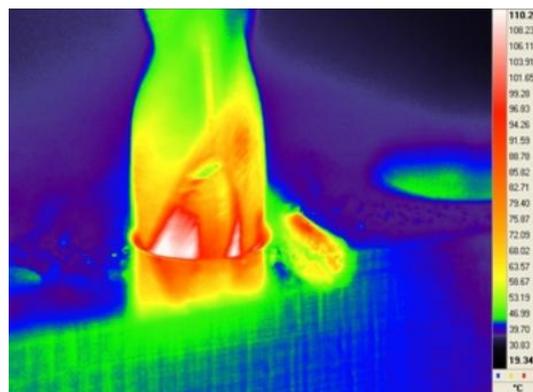


Ilustración 16. Cámara termográfica en mecanizado. Fuente: GRUPO ALAVA

- **Pirómetro:** Debido a que este método es objeto de estudio de este trabajo, en el siguiente apartado se estudia en detalle.

6.6 Pirometría

Como ya se ha visto, existen diferentes métodos para medir temperaturas, pero los métodos ya mencionados tienen diferentes inconvenientes a la hora de usarlos en procesos de rectificado. Sin embargo, este proyecto se centra en utilizar pirómetros para recoger datos de temperaturas. Por ello, en este apartado se ha recogido información acerca de esta metodología y de la tecnología que se emplea para la medición de temperaturas.

La pirometría es la medición de altas temperaturas mediante el uso de métodos ópticos. La relación entre la intensidad de dos radiaciones dadas dependen de la temperatura, por lo tanto al comparar la radiación emitida por un cuerpo a una

temperatura conocida con la radiación que emite a una temperatura desconocida se puede conocer la temperatura.

A finales de los años 60 se realizaron varios avances en el ámbito de la medición de temperaturas mediante el uso de infrarrojos. En 1966 la NASA publicó un informe en el que se describen aspectos prácticos de la medición de temperatura en superficies por medio de pirómetros.

Este documento incluye las ecuaciones fundamentales de la radiación, junto con las correcciones pertinentes para las mediciones con pirómetros. También se incluyen precauciones y procedimientos en la selecciones de los datos de la emisividad, reflectancia y transmitancia, acompañados de gráficas útiles para deducir las temperaturas reales de las lecturas del pirómetro [16].

6.6.1 Radiación y emisividad

Para medir temperaturas sin contacto es necesario medir el calor emitido por un cuerpo en forma de radiación. Es decir, es posible conocer la temperatura de un cuerpo en función de la radiación, o explicado de forma más coloquial, en función del color de la luz (longitud de onda) que emite. A partir de cierta temperatura el ojo humano puede apreciar esta luz en ciertos materiales, como por ejemplo el acero al rojo vivo. Todos los cuerpos que se encuentren a una temperatura superior al o absoluto, 0°K, emiten radiación.

Cuando se habla de radiación se hace referencia al transporte de energía calorífica que puede darse tanto en presencia como en ausencia de materia. La radiación va variando su longitud de onda en función de la temperatura. Este fenómeno viene recogido en la ley de Planck, la cual describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida.

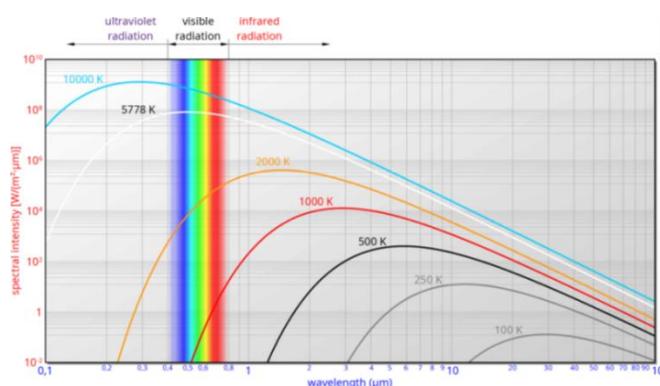


Ilustración 17. Conjunto de curvas de radiación a distintas temperaturas. Fuente: TEC-SCIENCE

La emisividad es la efectividad de un material a la hora de emitir la energía. Todos los cuerpos no son capaces de emitir toda esa energía en forma de radiación térmica. Es decir, sobre la superficie de cualquier cuerpo incide energía radiante, y parte de esta se transmite y otra se refleja. Los valores de emisividad varían

incluso para el mismo material dependiendo de distintos factores como puede ser la geometría, la temperatura o la textura superficial.

En el caso de un cuerpo negro toda la energía incidente desde el exterior es absorbida y toda la energía incidente desde el interior es emitida. Esto viene a decir que un cuerpo negro tiene una emisividad de 1, y emite toda la energía de radiación térmica, *Ilustración 19*. En la naturaleza no existen cuerpos negros. Sin embargo, un cuerpo negro se puede sustituir con gran aproximación por una cavidad con una pequeña abertura.

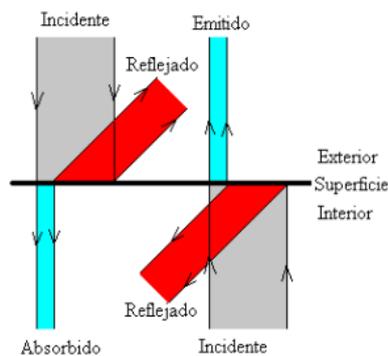


Ilustración 18. Esquema emisividad de un cuerpo. Fuente: UPV/EHU

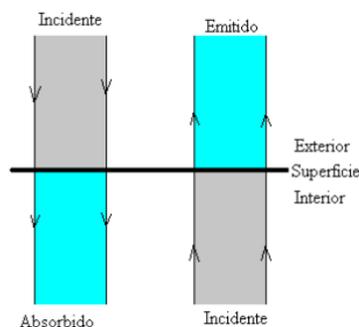


Ilustración 19. Esquema emisividad de un cuerpo negro. Fuente: UPV/EHU

La emisividad es un coeficiente que está entre los valores de 0 y 1, y se trata de la relación entre la energía térmica que emite la superficie del objeto y la de un cuerpo negro a esa misma temperatura:

$$\varepsilon = \frac{\text{radiación n emitida por una superficie}}{\text{radiación n emitida por un cuerpo negro}}$$

Ecuación 9. Emisividad

6.6.2 Pirómetro

Un pirómetro es un instrumento que mide la potencia de radiación emitida por una fuente de calor en un rango de longitud de onda concreto. Los pirómetros tienen fotodiodos, es decir, sensores que ante la presencia de luz emiten corriente eléctrica en función de la potencia en ciertas longitudes de onda. La característica más destacable de estos sensores es en qué rango de longitudes de onda son capaces de medir y cuál es la longitud de onda a la que es más sensible.

Se pueden encontrar diferentes tipos de pirómetros. La forma más común de clasificar los pirómetros es en función de los colores (fotodiodos) que tenga.

- **Pirómetro monocromático:** Un pirómetro monocromático, es decir, de un solo color, tiene únicamente un fotodiodo. Cuando se comenzaron a realizar trabajos con este tipo de tecnología para medir temperaturas en rectificado se usaban este tipo de pirómetros.

En [17] se emplea un pirómetro de un color, el cual va conectado a una fibra óptica, para medir temperaturas de la muela. Es necesario destacar que en este informe solo se recogen ensayos en seco. Con el fin de poder alejar el sensor de la fuente de calor en se decide usar fibra óptica, para conducir la luz desde el punto deseado hasta el sensor. El uso de fibra óptica para esta aplicación se ha repetido después en diferentes informes, como por ejemplo en [18] para un proceso de torneado.

En lo que a pirómetros monocromáticos respecta se pueden encontrar este tipo de pirómetros a diferentes rangos espectrales, es decir, que midan distintos rangos de longitudes onda, según lo que convenga para la aplicación.

Uno de los inconvenientes de estos pirómetros es que no son sensibles a los cambios de emisividad del material, y con grandes cambios de temperatura la emisividad como ya se ha subrayado anteriormente cambia. Es por ello que la lectura es poco precisa y requieren de una calibración constante.

- **Pirómetro dicromático:** Un pirómetro dicromático consta de dos colores y son capaces de medir la luz recibida en dos rangos espectrales distintos. Es por esto que este tipo de pirómetros proporciona una gran ventaja respecto de los monocromáticos. A diferencia de los diodos monocromáticos, los cuales tienen únicamente un fotodiodo, estos tienen un diodo compuesto por dos células fotosensibles, con diferentes rangos espectrales, que deben ser seleccionados con detalle dependiendo de la aplicación.

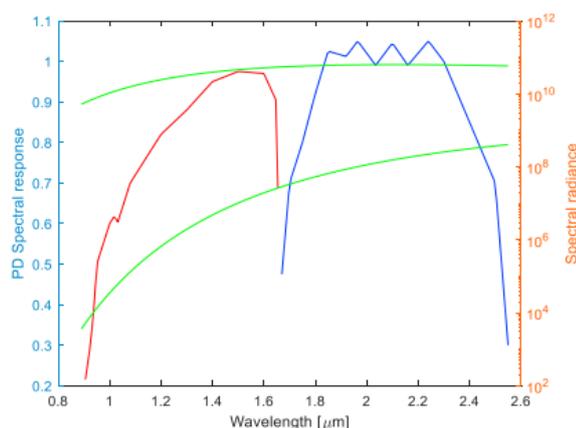


Ilustración 20. Respuesta espectral de las dos células fotosensibles de un fotodiodo de dos colores. Fuente: [19]

Tal y como se ha mencionado anteriormente, durante los cambios de temperaturas las superficies de los cuerpos medidos pueden variar su emisividad. Al constar de dos células fotosensibles dentro del fotodiodo la respuesta de una se puede comparar con la respuesta de la otra, es decir, se hace el cociente de las dos. De esta forma se consigue que la emisividad del material quede anulada en la ecuación y así evitar el mayor inconveniente de los pirómetros monocromáticos. Es decir, la variación de la emisividad de la superficie no afecta a las mediciones. Además, el pirómetro de un color debe ser calibrado con cada medición, sin embargo el de los colores solamente es necesario calibrarlo una vez.

- **Pirómetro dicromático con fibra óptica:** A pesar de las ventajas que aporta un pirómetro dicromático, el fluido de corte sigue siendo un inconveniente a la hora de realizar mediciones. Para hacer frente a este problema se han encontrado diferentes artículos [17,18], donde se hace uso de pirómetros dicromáticos con fibra óptica. La fibra óptica permite llevar la señal de luz hasta los sensores, sin necesidad de que estos estén cerca del punto de corte. De esta forma, se pueden alejar los sensores del punto de contacto, y por tanto, del fluido de corte. Esta tecnología ya ha sido desarrollada en el ámbito del rectificado plano, como se puede ver en [19], donde se desarrolla un pirómetro de dos colores para la medición de temperaturas en el rectificado de caras, haciendo uso de fibra óptica.

Por último, el rango de temperaturas que pueden medir los pirómetros es diferente. Existen pirómetros específicos y con distintos rangos dependiendo de la aplicación, pero los pirómetros con los rangos más amplios pueden medir desde temperaturas negativas hasta 3.000°C.

6.7 Refrigeración en rectificado

Tal y como se ha indicado antes, en los procesos de rectificado, al igual que en otros procedimientos de mecanizado, es habitual el uso de fluido de refrigerante. Debido a que uno de los objetivos principales de este estudio es variar las condiciones de refrigeración, y ver cómo afectan estos cambios a las mediciones de temperaturas, en este apartado se hará una revisión bibliográfica a cerca de la refrigeración en rectificado.

La refrigeración es un aspecto importante a tener en cuenta durante los procesos de rectificado, puesto que un proceso que cuente con un sistema de refrigeración óptimo puede tener diferentes beneficios como mayor efectividad, disminución del daño térmico en las piezas, lubricación en la zona de corte, limpieza de la muela y mantenimiento de los granos de esta, estabilización del proceso, control de los parámetros...

Como ya se ha señalado cuando se ha hablado de la energía específica, el calor generado durante el proceso tiene diferentes formas de ser evacuado, *Ecuación 6*. Una de las formas es mediante el fluido de corte. Se estima que, dependiendo de la refrigeración y del proceso, el q_f puede ir desde el 9% hasta el 52%. Esto quiere decir que la fracción de calor que se evacua por el fluido puede ser elevada si se ajusta bien la refrigeración, y evitar así que el calor se evacue por otros medios, sobre todo por la pieza.

En la actualidad se pueden diferenciar diferentes métodos de refrigeración en rectificado. Habitualmente estas técnicas de refrigeración se dividen en dos grupos: refrigeración convencional y formas alternativas de refrigeración.

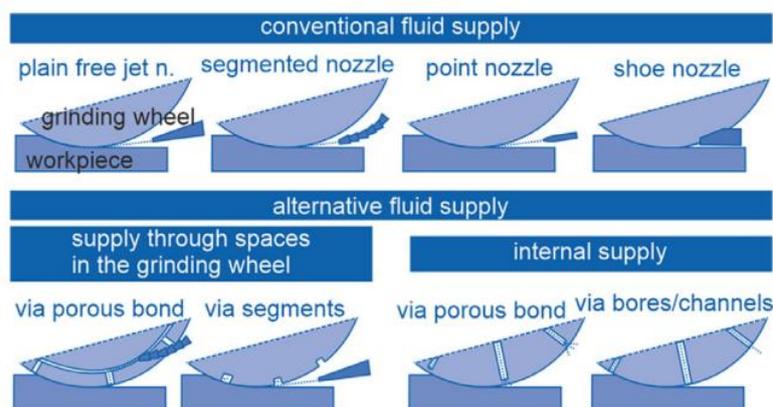


Ilustración 21. Clasificación de los métodos de refrigeración. Fuente: [22]

6.7.1 Métodos convencionales de refrigeración

Las técnicas convencionales de refrigeración en rectificado hacen uso de boquillas para liberar el chorro de fluido de corte en el punto deseado. La geometría de la boquilla empleada y el posicionamiento de la misma tienen una importancia significativa a la hora de aportar fluido de corte. Se suelen distinguir dos tipos de refrigeración convencional en función de las boquillas empleadas: Boquillas de chorro libre y boquillas de zapata.

- **Boquillas de chorro libre:** Dentro de este tipo se encuentran las boquillas más habituales, las cuales aportan en fluido en forma de chorro. Son las boquillas más convencionales y pueden tener diferentes tipos de sección, como por ejemplo sección cuadrada, redonda o rectangular. Las principales ventajas de estas boquillas es su fácil manejo y acople al proceso, y su bajo coste. Sin embargo, también tienen ciertas desventajas como por ejemplo el exceso de fluido aportado a la zona corte y la presión requerida para aportar suficiente fluido.

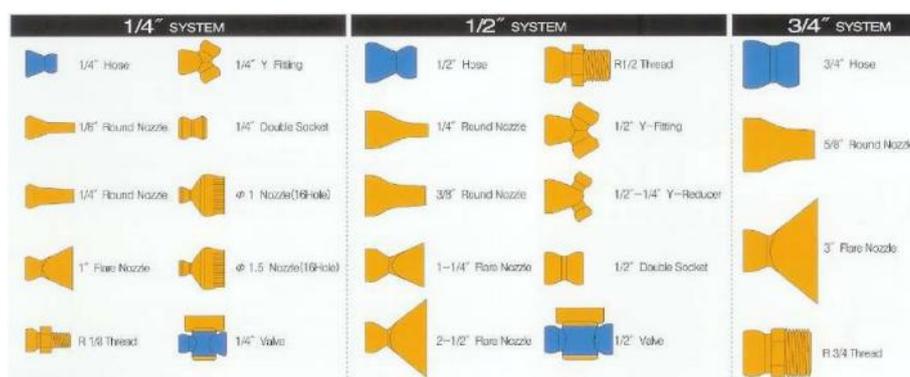


Ilustración 22. Boquillas de chorro libre. Fuente: Componentes del aire

- **Boquillas de zapata:** Este tipo de boquilla se diseñó para superar las desventajas de las boquillas anteriores y poder reducir la presión y el caudal en el aporte de la refrigeración, debido a que el transporte del fluido se hace por la rotación de la muela. Sin embargo, esto hace que la forma de la boquilla deba adaptarse al perfil de la muela y por ello que sea más complejo tratar de compensar el diámetro de la muela y el desgaste. [23]

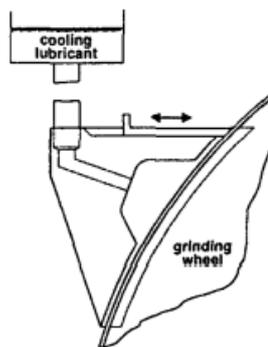


Ilustración 23. Boquillas de zapata. Fuente: [23]

Además de tener en cuenta el diseño de la boquilla y la posición en la que se coloque, el caudal, la presión y la velocidad (que es función de los dos anteriores) con la que se suministre el fluido son factores a tener en cuenta. Es necesario destacar que la velocidad de salida del chorro es función del caudal y se la sección transversal de la boquilla, por lo que se puede lograr una mayor velocidad de chorro variando el caudal.

$$\text{Caudal} = \text{Sección} \cdot \text{Velocidad} = \frac{\text{Volumen de fluido}}{\text{Tiempo}}$$

Ecuación 10. Caudal

Es necesario destacar que la velocidad de salida tiene una mayor influencia que el caudal [24] y que está demostrado que un aumento del caudal a una velocidad de salida constante no afecta al proceso. Sin embargo, es necesario controlar que la velocidad de salida sea suficiente para romper la barrera de flujo de aire que genera el giro de la muela. Algunos autores afirman que la velocidad del chorro y la velocidad de la muela deben ser iguales [25] pero también hay estudios donde se ha demostrado que basta con que la velocidad del chorro debe estar en un rango entre 0,6 y 1,0 veces la velocidad de la muela para romper la barrera de aire [26].

6.7.2 Métodos alternativos de refrigeración

Como este proyecto se va a centrar en las técnicas de refrigeración convencionales, se hará una revisión bibliográfica breve de los métodos alternativos de refrigeración.

A pesar de que los métodos convencionales de refrigeración son los más extendidos en la industria, cada vez son más los estudios que buscan diferentes formas de refrigeración convencional. Los métodos alternativos de refrigeración pueden ser diversos, y van desde muelas abrasivas especialmente diseñadas con espacios en el cuerpo, incluso con aporte interno del fluido desde el interior de la muela, hasta la refrigeración con CO₂.

El suministro de fluido de corte a través de espacios en la muela tiene como principal objetivo aumentar la cantidad de fluido en la zona de contacto. El fluido se aporta cerca de la zona de contacto a los orificios o ranuras en el cuerpo de la muela. Estas ranuras dirigen el fluido hacia la zona de contacto.



Ilustración 24. Muelas con ranuras para la refrigeración. Fuente [27]

Otra forma de refrigeración alternativa es el aporte interno, es decir, la refrigeración se suministra directamente a la zona de contacto desde el interior de la muela. Se suelen hacer perforaciones en las muelas abrasivas y se consigue que el líquido lubrique directamente la zona de corte, pero este método es costoso y difícil de implementar en la industria.

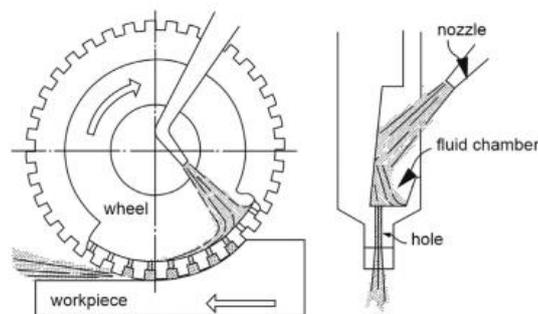


Ilustración 25. Refrigeración interna. Fuente [28]

Existe también la refrigeración criogénica en la cual se utiliza gas licuado a baja temperatura como fluido de corte. Por lo general, debido al coste y aplicabilidad, se usa dióxido de carbono. Este gas necesita un mecanismo de inyección para hacer posible su uso como fluido de corte [29].

7. Análisis de alternativas

Como se ha razonado anteriormente, la refrigeración durante los procesos de rectificado tienen gran influencia en el daño térmico de las piezas y las condiciones de refrigeración en las que se van a realizar las pruebas tienen un papel importante en el proyecto. Es por esto que se han estudiado las diferentes opciones y soluciones que se pueden adoptar en lo que respecta al aporte de fluido de corte.

7.1 Alternativas

Los ensayos y las mediciones que se van a realizar a lo largo de este proyecto se llevarán a cabo con una máquina específica, por lo que el sistema de refrigeración con el que se trabajará es convencional y de baja presión.

A pesar de esto, hay diferentes alternativas para hacer variaciones en la refrigeración.

Acoplar una bomba en paralelo

Para aumentar el caudal que se entrega a la zona de corte, el cual ronda los 0,5L/s, una alternativa podría ser hacer un acople de una bomba en paralelo, o cambiar la bomba del sistema.

Cambiar el codo

El fluido llega a la boquilla pasando por un codo de 90°. Esta geometría puede producir pérdidas de carga considerables, y sería interesante estudiar la influencia de las pérdidas de carga en el aporte de fluido de corte.

Además, este codo hace que el cambio de dirección sea muy brusco, lo que produce que el flujo que sale por la boquilla posiblemente sea turbulento y hay artículos [26] donde se subraya la importancia de que el flujo saliente de la boquilla sea laminar, es decir, que el fluido se mueva en láminas paralelas sin entremezclarse.

Cambios de boquillas

La geometría y la sección de la boquilla con la que se entrega el fluido a la zona de corte varían la velocidad, el caudal y el chorro. Usar diferentes boquillas podría ser objeto de estudio, para comprobar la relevancia de estas en el calor evacuado por la pieza durante el proceso.

Refrigeración criogénica

Otra alternativa podría ser el uso de una refrigeración distinta, como podría ser una refrigeración criogénica, ya que existen instalaciones portables, que requieren una instalación mínima. Con esta alternativa se podría estudiar la efectividad de la refrigeración criogénica respecto de la refrigeración convencional.

Modificar el refrigerante

El tipo de refrigerante, o la composición del mismo, pueden mejorar la lubricación del punto de corte. Una modificación en la composición podría aportar ventajas en el proceso.

7.2 Estudio de alternativas

Con el fin de elegir la alternativa más acertada, se estudiará el coste, la efectividad y facilidad de implementación de las diferentes opciones presentadas.

- **Coste:** Es importante tener en cuenta el factor económico de cada alternativa. Para tener en cuenta este factor, la puntuación será mayor cuando el coste sea menor.
- **Efectividad:** Es una característica de gran importancia, puesto que no todas los cambios en la refrigeración afectan por igual al proceso. Por esto, cuanto más efectiva sea la alternativa más puntuación tendrá.
- **Facilidad de implementación:** Las alternativas tienen diferentes grados de dificultad para ser llevadas a cabo, por lo que cuanto más fácil sea de instalar la alternativa más puntuación tendrá en la tabla.

No todas las características tienen el mismo peso a la hora de hacer la elección, por lo que el reparto de importancia se ha realizado de la siguiente manera: Coste 35%, efectividad 30% y facilidad de implementación 35%.

El coste y la facilidad de implementación son los factores con más peso en la puntuación, ya que de esta forma se evitará gastar demasiados recursos y será sencillo de adaptar al proceso.

La efectividad de la alternativa tendrá un 30% del peso total, ya que la solución adoptada deberá proporcionar variaciones en la refrigeración.

Tabla 5. Comparación de alternativas

CORRECCION DE FORMA		CALIFICACIÓN				
Característica	Peso	Bomba en paralelo	Cambio de codo	Cambio de boquillas	Refrigeración criogénica	Modificar el refrigerante
Coste	35%	6	8	9	5	6
Efectividad	30%	8	6	7	9	8
Facilidad de implementación	35%	7	9	9	6	5
Suma ponderada		6,95	7.75	8.4	6.55	6.25

El acople de una bomba en paralelo es una alternativa costosa, que puede requerir de más cambios en la instalación y el cambio de codo, a pesar de que es una alternativa fácil de implementar, no supondría demasiada variación en la refrigeración. La refrigeración criogénica sería una forma interesante de comparar dos tipos de métodos de refrigeración, pero es un sistema que no está implementado industrialmente y requiere de un equipo concreto, y modificar el refrigerante es una solución difícil, puesto que cada circuito está diseñado para funcionar con un refrigerante específico.

Por todo esto, la solución que más puntuación ha obtenido en la tabla es la del cambio de boquillas. Esta solución no requiere ningún tipo de instalación y es poco costosa. Además, variando boquillas, se podrá ver la influencia de estas en la evacuación del calor por la pieza.

8. Descripción de la solución propuesta sobre la medida de temperaturas en rectificado plano

En los puntos anteriores se ha tratado de realizar un estudio del conocimiento acumulado, en investigaciones previas escritas, sobre el proceso de rectificado con un enfoque térmico y la medida de temperaturas en este. Se ha empezado por hacer una breve introducción del rectificado, y los aspectos más destacables de este. Dado que este análisis se orienta más a la medición de temperaturas en procesos de rectificado y a la refrigeración en estos procesos, se ha hecho una revisión bibliográfica en torno a este contexto.

Por todo lo introducido en los apartados anteriores, se ha llegado a la conclusión de que hay diferentes maneras de realizar mediciones de temperaturas y de que existen distintos métodos de refrigeración. Este análisis ha mencionado las diferentes formas de medición de temperaturas pero, a pesar de esto, el objetivo principal de este estudio es realizar mediciones de temperatura usando pirómetros dicromáticos con fibra óptica.

La solución más acertada para este tipo de procesos es la de utilizar pirómetros dicromáticos simultáneamente. En cada uno de los pirómetros habrá un fotodiodo con dos células fotosensibles. Los pirómetros seleccionados han sido desarrollados en [8,19] para esta aplicación en concreto. Se han escogido los rangos espectrales de las células y se ha seguido la calibración de los pirómetros según [20,21], y siempre teniendo en cuenta cual será el uso de ellos. El rango de temperaturas de estos pirómetros es de 300°C a 1200°C.

Para poder alejar los pirómetros de la superficie de contacto se ha optado por seguir la solución presentada anteriormente y hacer uso de la fibra óptica. Por lo que cada pirómetro constará de una fibra óptica que llevará la señal desde el punto deseado, es decir, desde la pieza que se estará rectificando, hasta las fotocélulas, para que estas capturen la luz. A pesar de que las fotocélulas están alejadas del punto de contacto gracias a las fibras ópticas, se ha decidido introducir en una caja hermética los sensores, con el fin de aislarlos del fluido de corte y evitar que se dañen. La señal será llevada a un módulo de procesamiento, el cual estará conectado a un ordenador, para recoger los datos medidos por las fotocélulas.

Por último, es necesario destacar que, con este montaje, se mejora las principales desventajas respecto a los otros sistemas de medición de temperaturas ya mencionados, puesto que las mediciones no dependen del contacto con la pieza y se pueden realizar mediciones con fluido refrigerante.

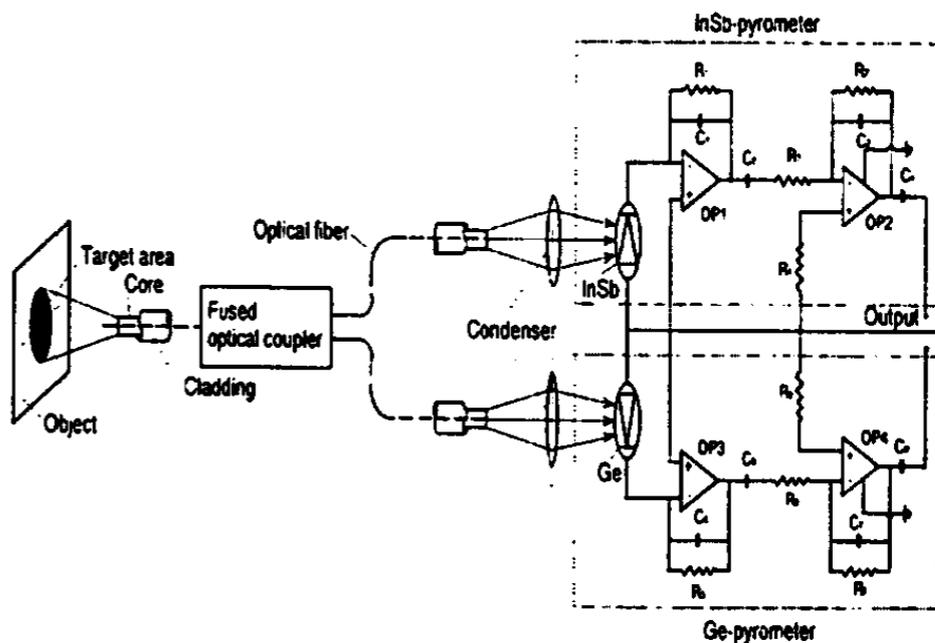


Ilustración 26. Esquema del la medición de temperaturas con fibra óptica. Fuente [19]

En cuanto al sistema de refrigeración elegido para la realización de ensayos, se ha concluido que debido a las alternativas que se han estudiado, se va a determinar la influencia de la refrigeración realizando ensayos sin fluido de corte y con diferentes boquillas. Las boquillas que se van a usar son boquillas de chorro libre, de sección diferente, y el fluido de corte del que se dispone es una emulsión de agua y aceite (5%).

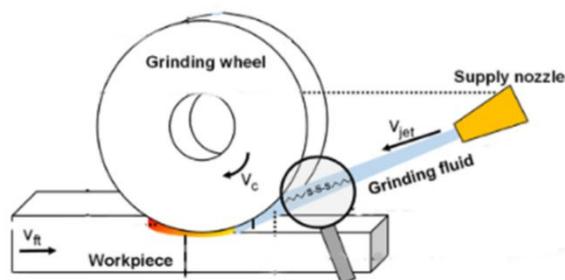


Ilustración 27. Esquema de refrigeración convencional. Fuente: [24]

9. Descripción de fases y tareas

En este apartado se van a describir las fases que conforman el proyecto y las tareas que se han desarrollado en cada una de estas.

9.1 Fase 1: Formación

Esta primera fase tiene su inicio en septiembre de 2020 y su principal objetivo garantizar los conocimientos necesarios para llevar a cabo el proyecto. Se pueden distinguir dos tareas dentro de esta fase: formación teórica y formación práctica.

Tarea 1.1: Formación teórica

La formación teórica se impartió de manera no presencial, debido a las limitaciones por COVID-19. Esta formación fue impartida por el personal docente de la Universidad del País Vasco, el mismo personal que posteriormente dirigirá los proyectos propuestos para la realización de esta educación cooperativa.

Tarea 1.1: Formación práctica

La formación práctica se llevó a cabo en los talleres de la Escuela de Ingeniería de Bilbao, en los edificios I-B y II-I, talleres en los que más adelante se desarrolla el proyecto. Esta tarea tiene como principal objetivo complementar los conocimientos adquiridos de manera teórica y aprender a manejar los equipos requeridos para el desarrollo del proyecto. Durante la formación práctica se aprende a utilizar diferentes máquinas: la rectificadora plana BLOHOM ORBIT 36, la rectificadora cilíndrica DANOBAT 600S y las máquinas de electroerosión por penetración ONA CS300 y por hilo ONA Prima E250.

También se adquieren conocimientos de diferentes softwares, como puede ser el SW Great y el DynoWare, para la adquisición de potencias y fuerzas, y de distintos instrumentos que serán utilizados más adelante, como el durómetro o reloj comparador.

9.2 Fase 2: Desarrollo del proyecto

La segunda fase del proyecto es el desarrollo del mismo y comienza cuando ya se han adquirido los conocimientos suficientes, en la primera fase, para poder manejar los equipos con destreza y de forma individual. Esta etapa tiene como objetivo principal dar comienzo al proyecto para, posteriormente, poder ejecutarlo de manera correcta y ordenada. Dentro de esta fase se pueden diferenciar tres tareas principales, ya que se requiere un primer planteamiento del proyecto y de los ensayos que se quieren realizar, una puesta a punto del equipo requerido y una preparación de los recursos necesarios para realización de los ensayos y del estudio en general.

Tarea 2.1: Planteamiento de ensayos

Un vez que se tiene una idea general del proyecto comienza la primera tarea de esta fase: desarrollar los ensayos. Esta tarea tiene como propósito el diseño del tipo de ensayo que se quiere realizar para determinar los recursos necesarios y así poder hacer una puesta a punto de los equipos y de las piezas.

Se desarrolla la técnica con la que se van a realizar los ensayos para la medición de temperaturas y se decide el tipo de probeta más adecuado para hacer las mediciones.

Tarea 2.2: Disposición del equipo

Una vez determinado el equipo y los recursos que se van a usar se hace una puesta a punto de estos para que estén en su estado óptimo a la hora de realizar los ensayos.

Por un lado, es necesario realizar lecturas con los pirómetros, cortar y limar las puntas de las fibras y realizar varias veces el montaje para comprobar que todo funciona de manera adecuada, incluido el software, Teraterm.

Por otro lado, se plantea y se prepara la forma en la que la pieza ira sujeta a la máquina, ya que las fibras se introducen por la parte inferior de la pieza, lo que hace que no se pueda imantar directamente a la mesa magnética. Para ello se fabrican unos calzos, rectificadas, y se realiza el montaje con la mordaza, los calzos y las fibras ópticas.

Finalmente, se hace la puesta a punto de la mesa dinamométrica y del medidor de potencia. Es importante realizar mediciones para comprobar que las lecturas de las fuerzas y de la potencia son correctas porque la monitorización de estas variables aporta información muy importante en los procesos. Dentro de la puesta a punto de estos dispositivos es necesario destacar que para preparar el medidor de potencia es necesario medir la resistencia que tiene, y si es necesario ajustarla.

Tarea 2.3: Preparación de piezas

La última tarea a realizar antes de concluir el desarrollo del proyecto es la de la preparación de las piezas. La geometría, medidas, material y características están ya definidas puesto que estas probetas fueron encargadas con anterioridad.

Las probetas son prismas rectangulares (ANEXO 2) de acero. Como el objetivo es introducir las fibras ópticas para que capten la señal y la conduzcan hasta los sensores, las piezas constan de dos agujeros ciegos. Dentro de estos agujeros ciegos se realizan otros agujeros ciegos más pequeños mediante la electroerosión por penetración.

9.3 Fase 3: Ejecución de ensayos

Una vez que los recursos y los equipos necesarios están preparados y probados, y se han fabricado las piezas, comienza la tercera fase del desarrollo del proyecto. Esta tercera fase corresponde a la realización de los ensayos para la adquisición de medidas de temperaturas mediante el uso de pirómetros y hacer después un procesado y análisis de las señales. Dentro de esta fase se pueden diferenciar dos tareas. Por una parte, antes de comenzar los ensayos propuestos se realizan ensayos preliminares. Por otra parte, una vez concluidos estos ensayos de prueba, se realizan los ensayos definitivos para la medición de temperaturas.

Tarea 3.1: Ensayos preliminares

Con el fin de tener una toma de contacto con el montaje final y adquirir unos resultados previos, se decide hacer unos ensayos iniciales. Estos ensayos permiten ajustar los parámetros acordados, como puede ser la profundidad de pasada o la velocidad de avance de la mesa. Como el objetivo es medir temperaturas es muy importante encontrar unos parámetros que produzcan altas temperaturas en las piezas, o por lo menos que se calienten las piezas lo suficiente como para que los pirómetros lo capten. Estos ensayos también permiten descartar diferentes ideas propuestas, como la medición de temperaturas realizando pasadas individuales, ya que el proceso no se estabiliza.

En resumen, esta tarea tiene bastante relevancia, porque proporciona información preliminar antes de hacer los ensayos finales. Esto ayuda a perfeccionar la técnica planteada con anterioridad, y realizar unos ensayos óptimos, aprovechando así los recursos y ajustándose más al objetivo.

Tarea 3.2: Ensayos

Esta tarea consiste en ejecutar los ensayos de los que se recogerán distintos datos, para poder hacer un procesado y análisis de resultados, y sacar conclusiones de ellos. Las condiciones de los ensayos han sido acordadas con los tutores de la Escuela de Ingeniería de Bilbao y con el tutor de IDEKO, y se han ido perfeccionando con los ensayos preliminares.

El objetivo de los ensayos es llevar a cabo el propósito de este estudio y realizar mediciones de temperaturas con pirómetros dicromáticos, para realizar algún tipo de variación en la refrigeración y ver de qué manera se comportan las temperaturas con estos cambios.

9.4 Fase 4: Tratamiento de datos y análisis de resultados

Una vez concluida la parte empírica del trabajo, y haber obtenido los resultados, se realiza el tratamiento de datos y se observan los resultados obtenidos

Tarea 4.1: Tratamiento de datos

En esta tarea se tratan los datos obtenidos en los ensayos. Estas señales están recogidas sin ningún tipo de filtrado, es decir, en crudo y suelen tener ruido, lo que interfiere en las mediciones. Por esto, es necesario realizar un tratamiento y filtrado de señales. Para esto se hace un tratamiento individual de las potencias, las fuerzas y las señales de los pirómetros. Estas últimas no dan valores de temperaturas directamente, por lo que se escribe un programa para la transformación de estas señales.

Asimismo, en esta tarea se calcula la profundidad de pasada real en cada pasada y la distancia de la superficie al agujero en cada una de las pasadas realizadas durante los ensayos.

Tarea 4.2: Análisis de resultados y conclusiones

Después de acabar la tarea 4.1 donde se tratan las señales y se calculan las variables, se hace un análisis de los datos. Para ello se hacen las relaciones y gráficos necesarios para examinar los resultados de manera óptima, y procesar toda la información que ha ido apareciendo a lo largo del estudio.

Una vez realizado el análisis de los resultados se presenta la información de manera clara y ordenada, y se sacan las conclusiones que han originado dichos resultados.

9.5 Fase 5: Redacción del proyecto

Esta última fase del estudio tiene como tarea principal pasar a escrito todo lo llevado a cabo en las fases ya descritas. Una vez obtenidos todos los resultados y las conclusiones se hace la redacción del proyecto, que deberá constar de los documentos necesarios. Con esta tarea se da por concluido el trabajo.

10. Descripción de equipos y materiales

10.1 Materiales

Los materiales usados para el desarrollo de los ensayos son los siguientes.

- Piezas

Las piezas usadas son prismas rectangulares, con una sección cuadrada de 20mm de lado y tienen un largo de 100mm. Cada pieza consta de dos agujeros ciegos, de 2mm de diámetro para introducir las fibras ópticas, situados tal y como se muestra en el Anexo 2.



Ilustración 28. Pieza

A pesar de tener estos agujeros se decide realizar agujeros de 1mm de diámetro dentro de los ya hechos, mediante un proceso de electroerosión por penetración. De esta forma se consigue que el fondo del agujero sea más plano y que el agujero sea más estrecho, por lo que la dispersión térmica será menor y el agujero se asemeja más a la realidad donde no habría ningún tipo de agujero.

En la siguiente ilustración se pueden apreciar los agujeros por los cuales serán introducidas las fibras. Tal y como se ve en el plano hay un primer agujero ciego, realizado con fresadora, y después hay uno más estrecho, el cual se realiza con electroerosión por penetración. La cota señalada en amarillo en la Ilustración 29 es una aproximación, ya que cada pieza y agujero están clasificados de forma individual en un documento de Excel. De esta forma se consigue optimizar la distancia desde el fondo del agujero a la superficie.

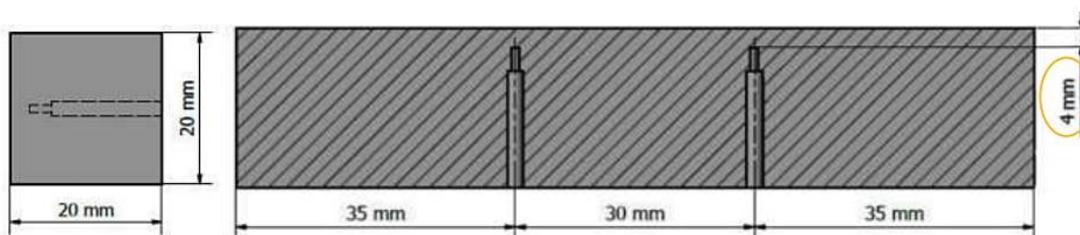


Ilustración 29. Dimensiones piezas

El material de las piezas es acero templado DIN 1.2510 (AISI 01), con la siguiente composición química.

Tabla 6. Composición química DIN 1.2510

DIN 1.2510 100MnCrW4	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	W
Min.	0,90	0,15	1,00			0,50	0,05	0,50
Max.	1,05	0,35	1,20	0,035	0,035	0,70	0,15	0,70

La dureza de las piezas varía entre 45HRC y 50HRC.

Tabla 7. Propiedades físicas y mecánicas del DIN 1.2510

Propiedad	Valor
Densidad	7,81g/cm ³
Punto de fusión	1.421°C
Modulo elástico	193 GPa
Conductividad térmica (a 95°C)	34 W/m°C
Coefficiente de dilatación térmica (20°C-205°C)	14,0 x 10 ⁻⁶ mm/mm/°C

- **Herramienta de rectificado**

La muela empleada para estos ensayos tiene la siguiente nomenclatura: 5MBA 46G12V489P20P. Es una muela convencional de alúmina, con 50% monocristal. El tamaño de grano es 46, lo que hace que un tamaño de grano medio y su dureza es G, es decir, es una muela relativamente blanda.



Ilustración 30. Muela

- **Boquillas**

Para llevar a cabo los ensayos se han empleado boquillas de chorro libre con diferentes geometrías.



Ilustración 31. Manguera de refrigeración y boquilla de sección circular



Ilustración 32. Boquilla de sección rectangular

Estas boquillas tienen la siguiente sección y proporcionan las siguientes características en la refrigeración:

Tabla 8. Características de la refrigeración

	Sección	Caudal	Velocidad
Boquilla redonda	176,9mm ²	0,92L/s	5,23m/s
Boquilla plana	28,3mm ²	0,55L/s	19,45m/s

- **Diamantador**

El diamantador que se ha usado para diamantar la muela es un diamantador de tipo blade. En este tipo de diamantadores los diamantes se encuentran alineados entre sí, y están insertados hasta abajo.



Ilustración 33. Diamantador

10.2 Equipos e instrumentos

La utilización de diferentes equipos es indispensable para llevar a cabo el proyecto. Para realizar este apartado se van a agrupar los equipos en diferentes categorías, dependiendo de en qué fase del proyecto se usen.

10.2.1 Preparación de probetas

Como ya se ha comentado con anterioridad, las probetas con las que se realizan los ensayos han sido encargadas con anterioridad. Esto hace que ya dispongan de los primeros agujeros ciegos realizados con fresadora y del tratamiento térmico hecho. En este proyecto para la preparación y elección de probetas se han empleado los siguientes equipos y recursos:

- **Máquina de electroerosión por penetración**

La electroerosión es un proceso de fabricación en el cual se genera un arco eléctrico entre la pieza y la herramienta, que en este caso es un electrodo. El proceso se lleva a cabo en un medio dieléctrico, y se consigue reproducir la forma del electrodo en la pieza con un arco eléctrico que consigue que se desprenda material de la pieza y electrodo.

En este proyecto se ha usado una máquina de electroerosión por penetración ONA CS300 para realizar agujeros dentro de los agujeros ciegos de las piezas y medirlos.



Ilustración 34. Máquina de electroerosión por penetración ONA CS300

- **Electrodo**

Los electrodos que se han elegido para llevar a cabo el proceso de electroerosión por penetración son electrodos de tungsteno de 1mm de diámetro. Son unos electrodos poco comunes debido a que su diámetro es muy pequeño, y se usan en aplicaciones muy específicas.



Ilustración 35. Porta electrodos con electrodo de 1mm.

- **Durómetro**

El durómetro es un instrumento de medición de dureza de piezas. En este caso se ha empleado para conocer la dureza de cada pieza individualmente y clasificarlas según esta. A pesar de que las piezas han sido templadas, las durezas varían, y este instrumento se ha usado para seleccionar las piezas con dureza poco variable.

Es un instrumento que cuenta con diferentes escalas y en este caso se ha usado la escala Rockwell C (HRC), porque es la que más se ajusta a las propiedades del acero templado.



Ilustración 36. Durómetro

- **Líquido desoxidante**

Para llevar a cabo el proceso de electroerosión por penetración es necesario que la pieza sea conductora. Sin embargo, con el tratamiento térmico las piezas tenían una capa aislante y con el fin de eliminarlas se ha empleado un líquido desoxidante. Es necesario subrayar que para la aplicación del líquido las manos deben estar cubiertas y también se recomienda llevar gafas protectoras, ya que este líquido es en su mayor parte ácido fosfórico, y puede generar lesiones en la piel.



Ilustración 37. Líquido desoxidante. Fuente: TITAN

- **Multímetro**

Se ha usado un multímetro digital para comprobar que las piezas son conductoras después de aplicarles el ácido.



Ilustración 38. Multímetro. Fuente: Xindar

10.2.2 Ejecución de ensayos

Para la realización de ensayos los equipos y programas informáticos que se han usado son los que siguen.

- **Rectificadora plana**

Este estudio tiene como objetivo medir temperaturas y variar las condiciones de refrigeración en procesos de rectificado. Por lo que para poder desarrollar el proyecto es necesario hacer los ensayos en una rectificadora.

La rectificadora en la que se van a realizar los ensayos es una rectificadora planeadora. Esta máquina permite realizar mecanizados de precisión, con buenos acabados superficiales. En este caso, la máquina es una BLOHM ORBIT 36. Esta máquina está equipada con una mesa magnética, la cual hace de amarre para los ensayos.



Ilustración 39. Rectificadora plana BLOHM ORBIT 36

- **Reloj comparador**

El reloj comparador es un útil de medición de dimensiones que compara cotas mediante la medición indirecta del desplazamiento del vástago de contacto con punta esférica. Se ha empleado para colocar la pieza alineada y para medir la profundidad total de pasada de cada ensayo.



Ilustración 40. Reloj comparador. Fuente: Mitutoyo

- **Medidor de potencia**

Durante los ensayos se conectaba el medidor de potencia con el fin de obtener los valores de la potencia consumida por el husillo de la máquina durante el proceso.



Ilustración 41. Medidor de potencia

Este aparato está conectado a las tres fases del motor y tiene la salida a una tarjeta de adquisición de datos, conectada a un ordenador. Esta tarjeta actúa como interfaz entre el ordenador y la señal recogida.



Ilustración 42. Tarjeta de adquisición de datos USB-6008(National Instruments)

- **SW Great**

El SW Great es el programa informático desarrollado en Python, con el que se recogen los datos de potencia adquiridos con el medidor de potencia. En este software es necesario ajustar el valor en ohmios la resistencia del medidor de potencia, la frecuencia de adquisición de datos y el tiempo de recogida.

- **Mesa dinamométrica**

Para la monitorización de las fuerzas normal y tangencial se utiliza una mesa dinamométrica, en este caso de la marca KISTLER. Se trata de un dinamómetro multicomponente capaz de medir fuerzas de hasta 10kN. El instrumento está compuesto por dos partes: el dinamómetro y el amplificador de canales. El dinamómetro recoge los datos de las fuerzas y se llevan hasta el amplificador, el cual está conectado a una tarjeta de adquisición y esta a un ordenador.



Ilustración 43. Mesa dinamométrica KISTLER

- **DinoWare**

Para la adquisición de datos de fuerzas se usa el programa DynoWare, el cual ha sido proporcionado por KISTLER. En el software hay que ajustar los canales y el tiempo y frecuencia de adquisición. Este programa permite la visualización de los valores de las fuerzas a tiempo real.

- **Mordaza y calzos**

Para amarrar la pieza se hace uso de una mordaza de la marca Fervi, la cual va atornillada a la mesa dinamométrica.



Ilustración 44. Mordaza. Fuente: Fervi

Como la mordaza es más alta que las piezas se usan unos calzos rectificaos para elevarla y evitar que la fuerza normal empuje la pieza hacia abajo.



Ilustración 45. Calzos

10.2.3 Análisis de resultados

Una vez concluidos los ensayos se analizan las piezas y los datos recogidos durante las mediciones. Los equipos y el material empleado durante esta fase es el que sigue.

- **Máquina de electroerosión por hilo**

El proceso de electroerosión por hilo, al igual que el proceso de electroerosión por penetración, extrae material mediante una serie de descargas eléctricas entre una herramienta que actúa como electrodo y una pieza conductora, en presencia de un fluido dieléctrico. A diferencia que en la electroerosión por penetración, en la electroerosión por hilo el electrodo que se usa es un hilo metálico, lo que permite realizar cortes en piezas.

Con el objetivo de conocer la distancia final a la superficie que queda después de cada ensayo, se cortan las piezas transversalmente. Los cortes se realizan cerca de los agujeros, para luego rectificarlos y así descubrirlos con mayor precisión. No es necesario cortar todos los agujeros ya que algunos se llegan a descubrir durante el ensayo.

La máquina usada para este proceso es una ONA prima E250.



Ilustración 46. Máquina de electroerosión por hilo

- **Hilo**

El hilo usado en el proceso de electroerosión por hilo es de latón y tiene un diámetro de 0,25mm.

- **Microscopio confocal Leica**

Como la precisión que se necesita para medir la distancia final del agujero a la superficie es de micras, se ha optado por medirla con el microscopio confocal Leica DCM 3D.



Ilustración 47. Microscopio Leica

10.3 Descripción de los pirómetros

Dada la importancia que tiene la medición de temperaturas en el proyecto se ha decidido reservar un apartado para describir el equipo de medición de temperaturas.

- **Pirómetros**

Para recoger datos de temperaturas se hace uso de dos pirómetros, los cuales están acoplados el uno al otro, para que no se muevan, y están sujetos a una caja hermética, para asegurar su estanqueidad. El hardware completo consta de dos pirómetros, de la marca HAMAMATSU, además de una electrónica de control y un convertidor de alimentación.

Cada módulo tiene dos canales, uno por cada célula fotosensible, por lo que en total hay cuatro salidas con lecturas de potencias de longitudes de onda, y una quinta conexión que es la alimentación de los módulos. Estas salidas llevan las señales al adaptador de interfaz GPIB-USB, mediante cables SDI, y la señal se lleva al ordenador.

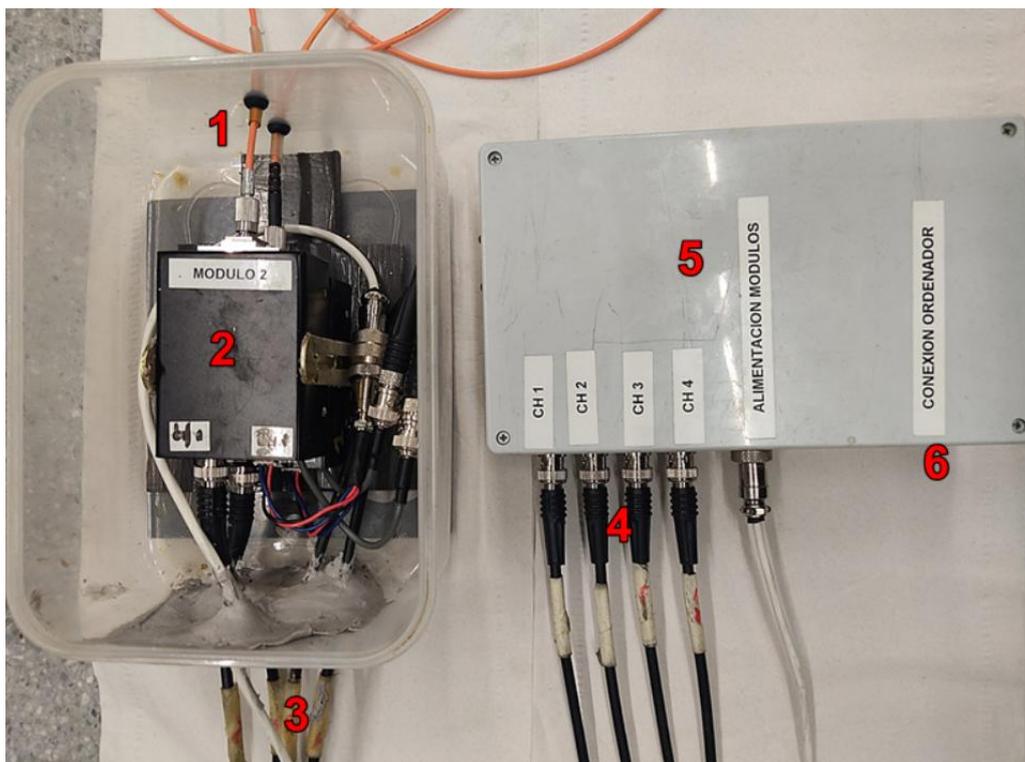


Ilustración 48. Sistema de medición de temperaturas

En la *Ilustración 48* se observa el montaje para la recogida de datos con los pirómetros, con los diferentes componentes. Los números hacen referencia a las siguientes partes:

1. Fibras ópticas.
2. Módulos.
3. Salida de datos.
4. Entrada de datos.
5. Adaptador de interfaz GPIB-USB.
6. Salida USB al ordenador.

- **Fibra óptica**

Para hacer llegar la señal hasta los pirómetros se ha usado fibra óptica de 0,4mm de diámetro. El conector que se ha usado para conectar la fibra a los módulos es un conector FC.



Ilustración 49. Conector fibra óptica. Fuente: Fibra de hoy

Para garantizar una buena recogida de datos mediante las fibras ópticas es necesario hacer un buen mantenimiento de la puntas de las mismas. Para ello se cuenta con una tijera para cables, y dos hojas de lapeado de óxido de aluminio, de la marca Thorlabs, y de distinto grosor.

- **Teraterm**

El software Teraterm es el programa que se emplea para recoger los datos de los pirómetros. Es un programa con una interfaz sencilla, donde se puede seleccionar la velocidad de adquisición de datos entre 1000Hz y 10.000Hz. No se selecciona el tiempo de captura, cuando se desee acabar la captura se puede parar. El programa tiene un máximo de memoria de 6 millones de datos, es decir, a una velocidad de 10.000Hz el tiempo límite de captura es de 10 minutos.

- **MATLAB**

Este programa es un sistema de cómputo numérico que tiene un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Este software se ha usado para escribir un programa en el cual se introducen los datos recogidos por los pirómetros y devuelve las lecturas equivalentes en temperatura.

11. Descripción del procedimiento

En este apartado se va a detallar el procedimiento seguido para la realización de los ensayos. Para ello se van a diferenciar tres apartados diferentes: puesta a punto, metodología de los ensayos y mediciones y tratamiento de datos.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido en el proyecto de forma detallada.

1. Puesta a punto
 - a. Piezas
 - b. Diseño del proceso
2. Metodología seguida en los ensayos
 - a. Montaje
 - b. Ensayos

3. Mediciones y tratamiento de datos
 - a. Medición de piezas
 - b. Tratamiento de datos
 - c. Temperaturas

11.1 Puesta a punto

Para poder realizar los ensayos es necesario preparar las piezas y diseñar el proceso.

11.1.1 Piezas

El primer paso para la elección de las piezas es medir la dureza de las mismas, haciendo uso de un durómetro. De esta forma se clasifican las piezas en un archivo Excel, puesto que algunas estaban mal templadas. Las piezas seleccionadas para los ensayos tienen una dureza entre 45HRC y 50HRC.

Para comprobar que las piezas sean conductoras, lo que es indispensable para el proceso de electroerosión, se mide la conductividad con un multímetro. A las piezas que no sean conductoras se les aplica un líquido desoxidante, haciendo uso de guantes, y se las deja reposar un día. Después se limpian las piezas, ya que se queda una costra en ellas, y se comprueba con el multímetro que conducen electricidad.

Una vez que las piezas conducen se realizan agujeros dentro de los agujeros ciegos mediante un proceso de electroerosión por penetración. Para llevar a cabo este proceso se amarra la pieza con una mordaza y se coloca el electrodo de 1mm de diámetro en el porta electrodos. Como se quiere controlar la profundidad de los agujeros se hace un primer contacto en la parte superior de la pieza (*Ilustración 50 A*), y se toma esa referencia como el 0. Después, se introduce el electrodo en el agujero ciego y se realiza otro contacto para comprobar la profundidad del agujero ya existente (*Ilustración 50 A*).

Se programa la máquina, con los materiales de la pieza y el electrodo, y con la rugosidad del proceso, es decir, la aspereza producida por la chispa. Se elige una rugosidad de 22VDI, ya que es un valor de acabado fino porque se quiere un buen acabado en el agujero, y se erosiona hasta 2mm por debajo del agujero ya existente (*Ilustración 50 B*). Una vez acabado el proceso se realiza otra vez un contacto en la superficie de la pieza para volver a hacer el 0 (*Ilustración 50 C*), porque el electrodo se desgasta y la máquina no tiene en cuenta esa diferencia. Se introduce el electrodo de nuevo en el agujero y se hace un contacto en el fondo del agujero hecho (*Ilustración 50 C*), de esta forma se pueden clasificar las medidas de todos los agujeros.

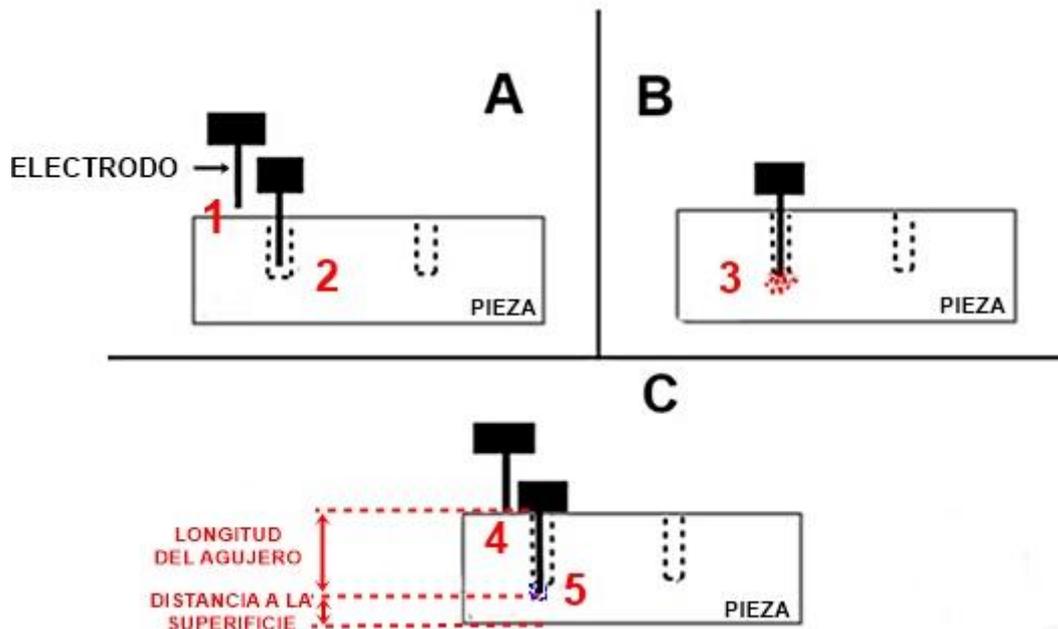


Ilustración 50. Pasos del proceso de electroerosión por penetración

Una vez realizado el primer agujero de una pieza se intenta que el segundo sea de una profundidad similar, para que sean lo más parecidos posibles. El proceso no se automatiza puesto que, como ya se ha dicho, el electrodo se desgasta y la máquina no lo compensa, y es necesario medir la profundidad de los agujeros después de cada proceso.



Ilustración 51. Proceso de electroerosión por penetración

Una vez finalizado este proceso, se anota la longitud de cada agujero en una hoja de cálculo. Para ello se diferencian los agujeros como "izquierda" y "derecha". El agujero de la derecha será el que este al lado del número de la pieza, y el izquierdo el agujero restante.

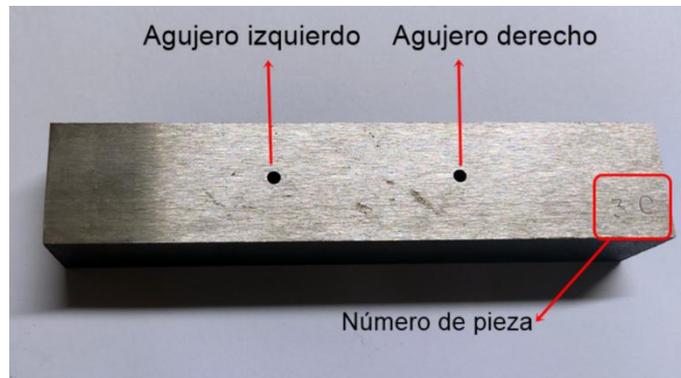


Ilustración 52. Clasificación de agujeros

Una vez clasificados los agujeros se mide la altura de las piezas. Para ello se usa un reloj comparador y la rectificadora. Se coloca en 0 el reloj a la altura de la mesa magnética y se apunta las coordenadas de la máquina. Luego se lleva el reloj a la parte superior de la pieza y se ajusta hasta que marque 0 (Ilustración 53), y se hace la diferencia entre las coordenadas de la máquina.



Ilustración 53. Medición de la altura de la pieza

Por último, se hace la diferencia entre el alto de la pieza y la longitud del agujero, y de esta forma se puede calcular la distancia desde el fondo del agujero a la superficie de la pieza (Ilustración 50). Esta medida es la más importante de la pieza, porque es la distancia a la superficie a la que se encontrará la fibra al comenzar los ensayos.

11.1.2 Diseño del proceso

Por una parte, como uno de los objetivos principales de los ensayos es medir temperaturas, se diseñan unos ensayos preliminares con unos parámetros que permitan alcanzar temperaturas altas.

Para ello, la primera variable que se tiene en cuenta es el ratio de velocidades, puesto que cuando esta variable supera un valor de 120 el proceso entra en zona de daño térmico, y se producen altas temperaturas. Para elevar este valor se decide bajar la velocidad de avance, por debajo de lo que sería un valor más común en un proceso industrial. La velocidad de giro se mantiene en un valor normal para una muela convencional.

Después, se determina una profundidad de pasada que sea óptima para lograr altas temperaturas, es decir, elevada para que el proceso sea agresivo, pero que permita maximizar el número de pasadas y así poder aprovechar la distancia desde el agujero a la superficie.

Por todo esto los parámetros y las variables de los ensayos preliminares son los siguientes:

Tabla 9. Parámetros y variables de los ensayos preliminares

Parámetro/ Variable	Valor
a_e	0,05mm
v_s	30m/s
v_w	5000mm/min
q_s	360
Q_w'	4,16mm ³ /mm·s

También es necesario destacar que la pasada siempre se va a hacer de izquierda a derecha, y de derecha a izquierda se hará el apagado de chispa, es decir, que la máquina meterá profundidad de pasada de izquierda a derecha y de derecha a izquierda volverá en la misma cota.

Por otra parte, para ver la influencia de la refrigeración en el proceso se decide realizar ensayos preliminares en seco y con las siguientes condiciones de refrigeración:

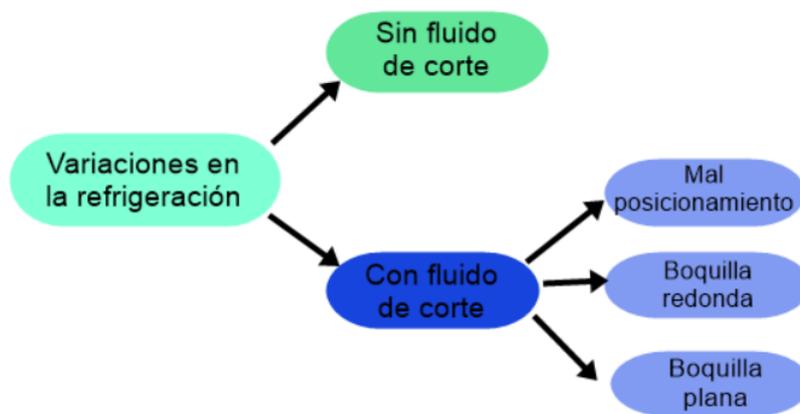


Ilustración 54. Esquema de las condiciones de refrigeración

Para ver si influye el posicionamiento de la manguera en las temperaturas se realiza un "mal posicionamiento" del chorro *Ilustración 64*, situándolo lejos del punto de corte. En los ensayos denominados como "boquilla redonda" y "boquilla plana" la salida del chorro se acerca al punto de contacto *Ilustración 63*.

Asimismo, hay que destacar que la configuración que se va a usar para la refrigeración se conoce como "Down Grinding". Esto quiere decir que el giro de la muela, la salida y el avance cuando se hace la pasada tienen el mismo sentido, tal y como se muestra en la *Ilustración 55*.



Ilustración 55. Configuración Down Grinding

11.2 Metodología seguida en los ensayos

11.2.1 Montaje

- **Montaje de los pirómetros**

Para realizar el montaje del sistema de medida de temperaturas se realizan las siguientes conexiones, siguiendo la siguiente ilustración:

1. Conexiones de los canales
2. Conexión de la fuente de alimentación
3. Conexión entre módulos
4. Conexión de las fibras ópticas
5. Conexión al ordenador

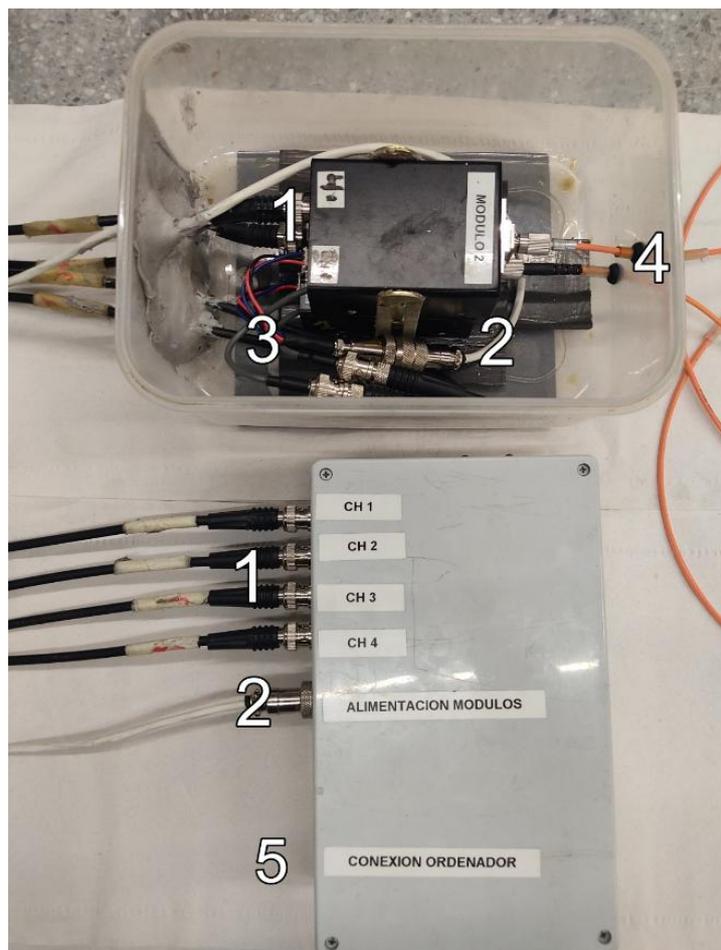


Ilustración 56. Conexiones de los pirómetros

- **Preparación y montaje de las fibras ópticas**

Para preparar el ensayo es necesario cortar la punta de las fibras, retirando cable si fuera necesario, y se lijan con hojas de lapeado. Para ello, se frotran las superficies con las hojas que tienen un abrasivo de grano muy fino, primero con la de 3 μm y después con la de 1 μm .

Los números de la *Ilustración 57* a las siguientes partes:

1. Fibras ópticas.
2. Tijera para cables.
3. Hoja de lapeado de 3 μm .
4. Hoja de lapeado de 1 μm .

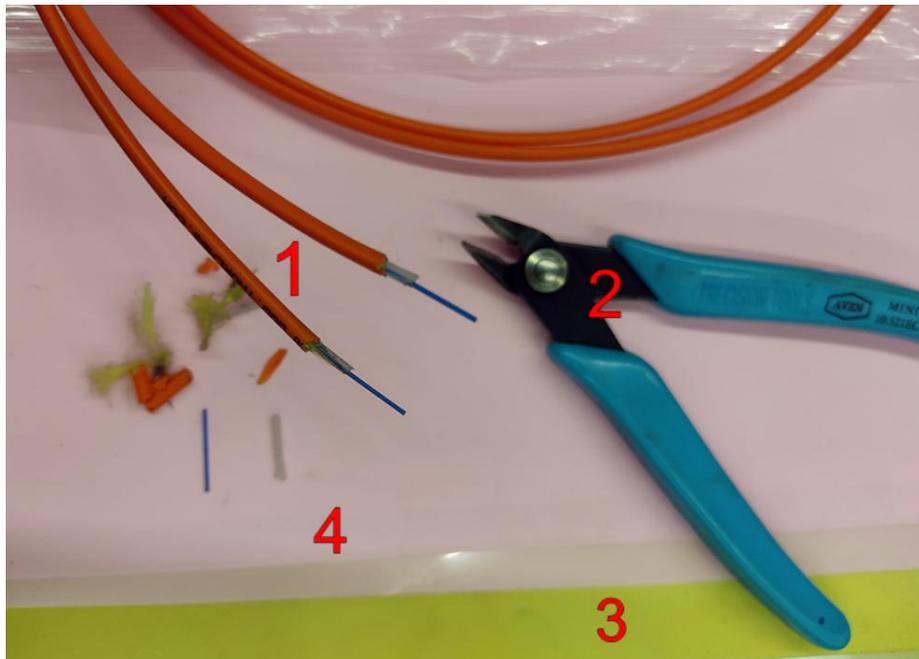


Ilustración 57. Herramientas para la conservación de las fibras ópticas

Una vez preparadas las fibras, se introducen en los agujeros de la pieza. Para ello se pasan las fibras por debajo de la mordaza (*Ilustración 58*) y se meten hasta que hagan tope al fondo del agujero. Hay que tener especial cuidado en no tirar de ellas, puesto que se podrían salir.

Después se colocan los calzos sobre la mordaza, dejando espacio para que pasen los cables por debajo, y se apoya la pieza encima.

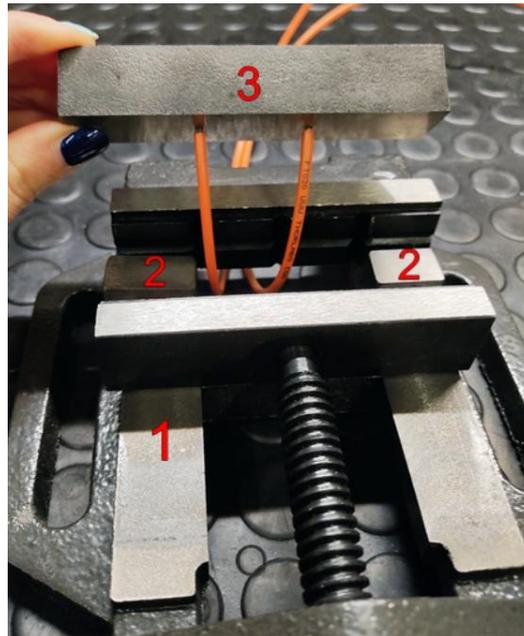


Ilustración 58. Montaje de fibras y pieza

Esta configuración descrita se puede ver en la *Ilustración 58*, donde los números corresponden a los siguientes elementos:

1. Mordaza.
2. Calzos.
3. Pieza.

- **Montaje completo**

Para realizar la disposición completa del ensayo (*Ilustración 59*) se imanta la mesa dinamométrica a la mesa magnética, realizando las conexiones necesarias con el equipo de medición de fuerzas, y, sobre ella, se atornilla la mordaza con la pieza. Debajo de la pieza se sitúan los calzos, y las fibras introducidas por los agujeros, tal y como se ha detallado en la *Ilustración 58*.

La caja hermética con los módulos se pone sobre la mesa de la máquina, alejada del punto de corte, y se coloca el reloj comparador para alinear la pieza con la mesa y con la muela.

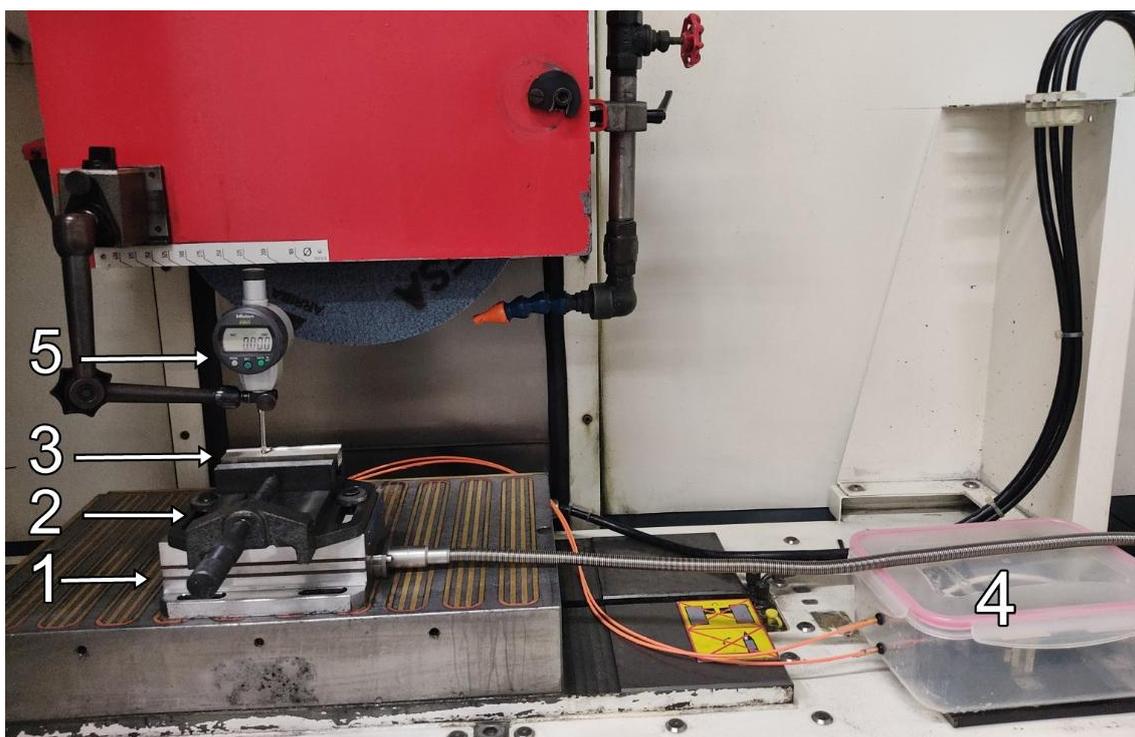


Ilustración 59. Montaje

En la *Ilustración 59* se señalan los elementos descritos anteriormente con los siguientes números:

1. Mesa dinamométrica
2. Mordaza
3. Pieza con calzos debajo y fibras introducidas
4. Caja hermética con módulos
5. Reloj comparador

11.2.2 Ensayos

- **Planeado de la pieza**

Para dejar la superficie completamente plana se hace un planeado. Para ello se pasa el reloj comparador por la pieza y se compara el punto más alto y el punto más bajo de la superficie para saber cuánta profundidad quitar.

También es necesario situar los agujeros en la superficie y comparar estas cotas con la cota más alta, puesto que el 0 se hace desde el punto más alto y no se rectifica la misma distancia en el punto más alto que en los agujeros.

De esta manera se conoce la distancia que se rectifica sobre cada agujero, y se puede controlar en todo momento la distancia a la superficie desde cada agujero, tal y como se muestra en la *Ilustración 60*.

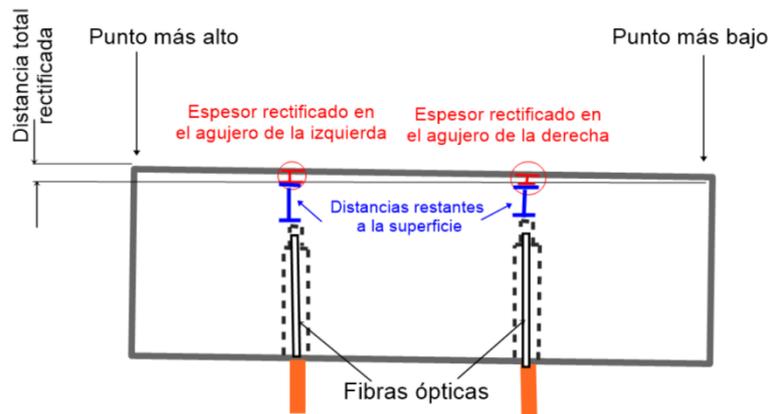


Ilustración 60. Planeado de la pieza

- **Desbaste con escalón**

Después del planeado, se hace un desbaste para reducir la distancia desde los agujeros a la superficie, hasta dejar aproximadamente 1mm. De esta forma la fibra está más cerca del punto de corte y será más fácil captar señales.

Para controlar la profundidad que se elimina en el desbaste se deja sin rectificar una parte de la superficie a modo de escalón. Una vez realizado el desbaste, con el reloj comparador se mide la diferencia entre el escalón y la superficie rectificad[a], en la superficie de ambos agujeros. Así, se hace la resta entre la distancia a la superficie desde el agujero que había antes y la profundidad eliminada, y se sabe la nueva distancia a la superficie desde los agujeros. Es importante controlar siempre esta cota para saber el número de pasadas a realizar en el ensayo, sin destapar los agujeros.



Ilustración 61. Desbaste con escalón

- **Ensayo**

Una vez realizado el montaje, el planeado y el desbaste se realizan los ensayos con los parámetros y condiciones definidas en el diseño del proyecto. En este ensayo es necesario ajustar los parámetros del proceso, las condiciones de refrigeración y monitorizar las potencias, fuerzas y temperaturas. Para ello se siguen los siguientes pasos representados en la *Ilustración 62*:

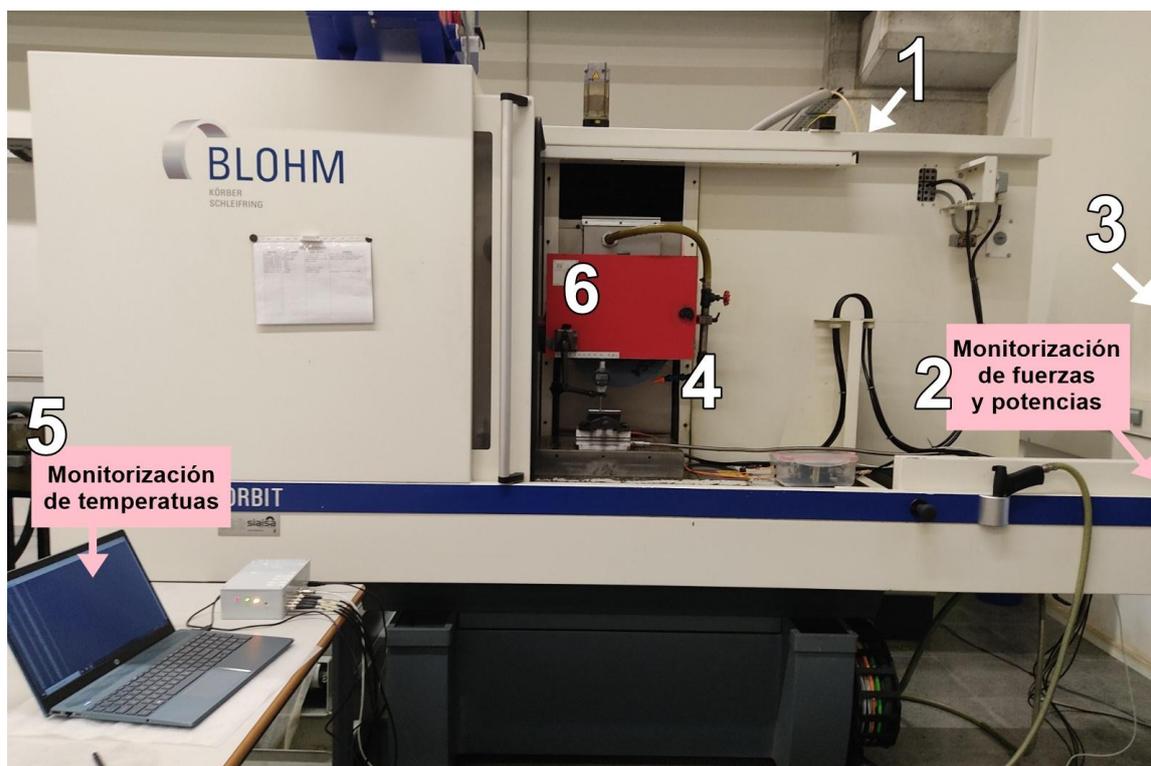


Ilustración 62. Ejecución del ensayo

- 1. Ajuste de la resistencia del medidor de potencia:** Con un multímetro se mide el valor de la resistencia del medidor de potencia y se ajusta. En este caso se ajusta a 25kOhm.
- 2. Monitorización de fuerzas y potencias:** Se abre el programa SW Great para la adquisición de potencias, en el cual hay que ajustar el valor de la resistencia del medidor de potencias, y el DynoWare, para la monitorización de fuerzas. En ambos programas es necesario definir el tiempo de ensayo.
- 3. Ajuste de parámetros:** Se introducen en el software de la máquina los parámetros acordados en el diseño del proceso.
- 4. Montaje de la refrigeración:** En el caso del ensayo en seco no es necesario ajustar nada. Sin embargo, es necesario cambiar la boquilla y poner la redonda para los ensayos con la taladrina mal posicionada y bien posicionada, y la boquilla plana para hacer el ensayo con taladrina bien posicionada.

En la *Ilustración 63* se observa que la manguera es más larga y que las boquillas están más cerca de la muela que en la *Ilustración 64*. Esto permite que el chorro este más pegado al punto de corte y llegue más fluido al punto de corte en la *Ilustración 63* que en la *Ilustración 64*.

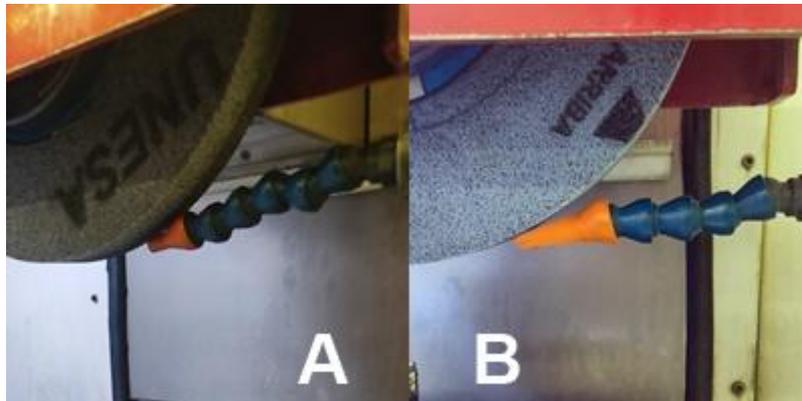


Ilustración 63. Boquillas bien posicionadas



Ilustración 64. Boquilla mal posicionada

- 5. Medición de temperaturas:** para la adquisición de temperaturas de abre el programa Teraterm y se fija la frecuencia de adquisición de datos en 10.000Hz. Es la frecuencia más alta permitida por el programa, pero de esta forma se obtiene el mayor número de datos por segundo posible.
- 6. Ejecución del ensayo:** Se acerca la muela a la pieza para comenzar con las pasadas, dejando el mismo escalón que en el desbaste, y comienza la captura de datos del Teraterm. Cuando el programa comienza a leer, se empieza la recogida de datos de potencias y fuerzas, y comienzan las pasadas. En la *Ilustración 65* se muestra el momento en que se realiza una pasada, tanto en seco (B) como con taladrina (A).

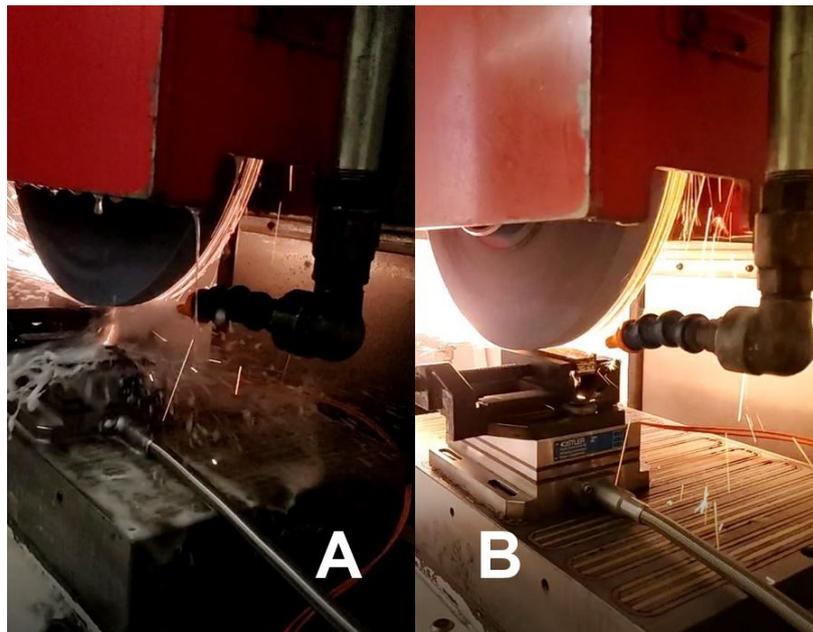


Ilustración 65. Ejecución de ensayos en seco y con taladrina

7. **Guardar datos:** Una vez finalizado el ensayo se guardan los datos recogidos por los pirómetros, el medidor de potencia y la mesa dinamométrica en archivos de texto.
8. **Medición del escalón final:** Al igual que en el desbaste, se mide la diferencia de cotas entre la superficie rectificada y el escalón se deja sin rectificar a modo de referencia. De esta forma se conoce la profundidad de material eliminado en todo el ensayo. Esta profundidad acumulada se usará después en el análisis de los datos.

11.3 Mediciones y tratamiento de datos

11.3.1 Mediciones de piezas

Para conocer la distancia final a la superficie desde los agujeros, y por tanto la distancia a la que se ha hecho el último apagado de chispa, se realiza el siguiente procedimiento:

- **Corte de piezas**

El primer paso en este procedimiento consiste en cortar las piezas transversalmente, es decir, paralelamente al agujero, sin llegar a tocar el agujero. Este procedimiento se lleva a cabo en una máquina de electroerosión por hilo. Es importante cortar las piezas cerca de los agujeros, sin llegar a tocarlos, puesto que luego se destaparán con mayor precisión.

Para ello, se amarra la pieza desde un extremo y se cortan los agujeros. En la siguiente imagen se observa el proceso completo del corte de los dos agujeros.

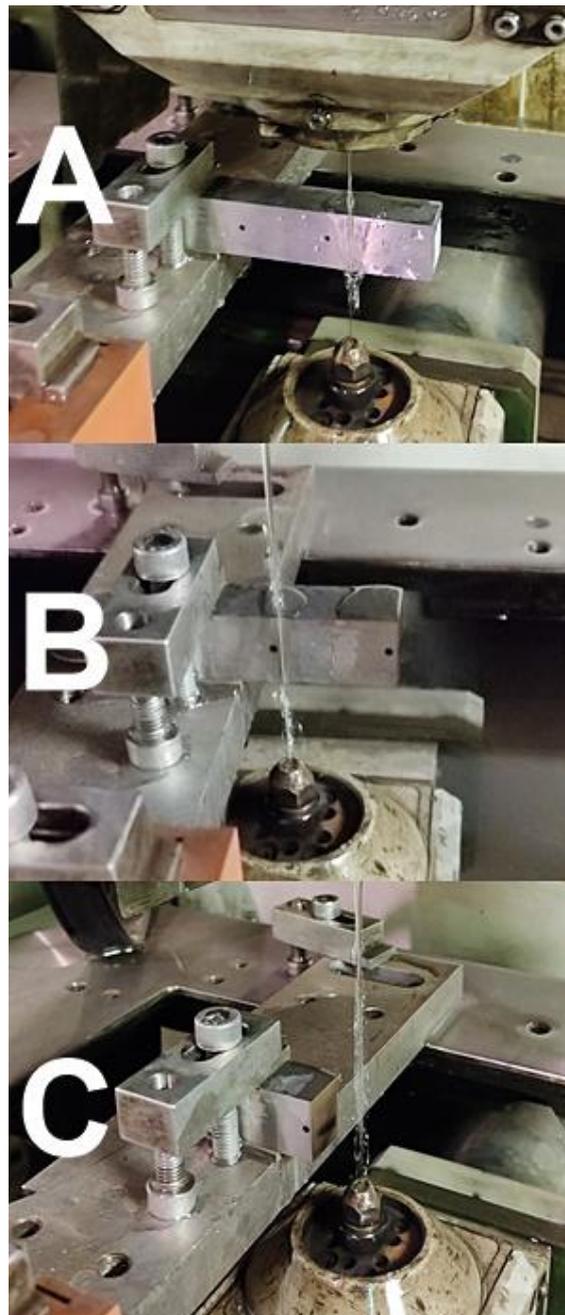


Ilustración 66. Corte por electroerosión con hilo

- **Rectificado de agujeros**

Para descubrir los agujeros con mayor precisión se rectifican las superficies cortadas hasta descubrir el agujero. De esta forma la distancia final del agujero a la superficie quedará al descubierto y podrá ser medida.

Para realizar este procedimiento se coloca el trozo de pieza con el agujero en la mordaza y se rectifica. En la siguiente imagen se puede ver cómo queda la superficie del agujero y como se destapada la distancia a la superficie desde el agujero.



Ilustración 67. Agujero descubierto por rectificado

En la *Ilustración 68* se pueden apreciar distintos trozos de piezas después de destapar los agujeros.

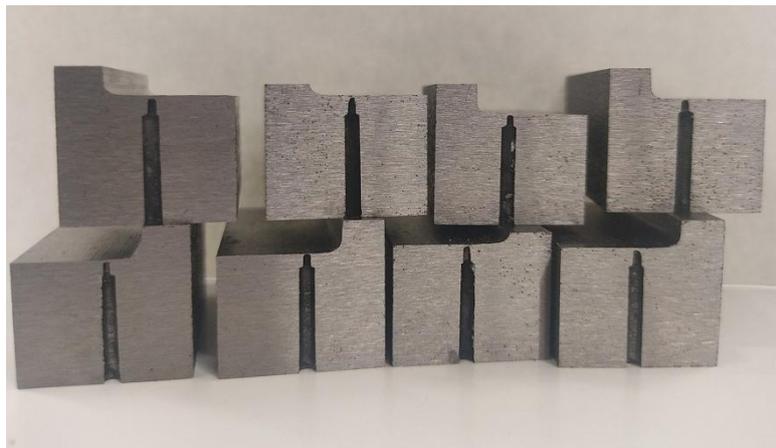


Ilustración 68. Piezas cortadas y rectificadas

- **Medición de la distancia final a la superficie**

Para medir con precisión la distancia final entre el agujero y la superficie se usa un microscopio confocal. Para ello, se elige el objetivo, en este caso se usa un objetivo HC PLFLUOTAR 5x 0.15 (*Ilustración 69*) para todas las mediciones, y se ajusta la luz.

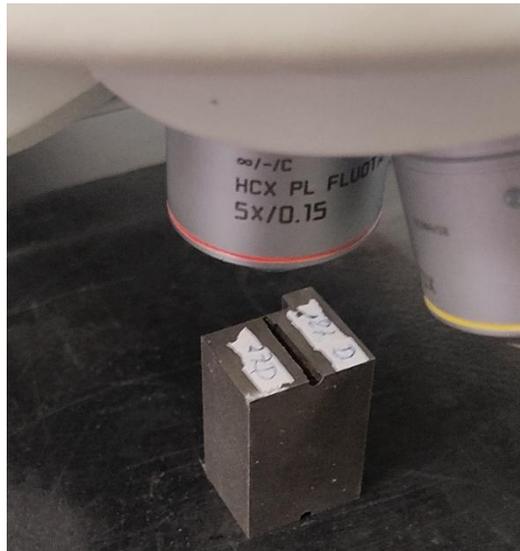


Ilustración 69. Medición con microscopio

Después se captura una foto del agujero y la superficie (*Ilustración 70*), en la que se observe la distancia del agujero a la superficie, y se mide.

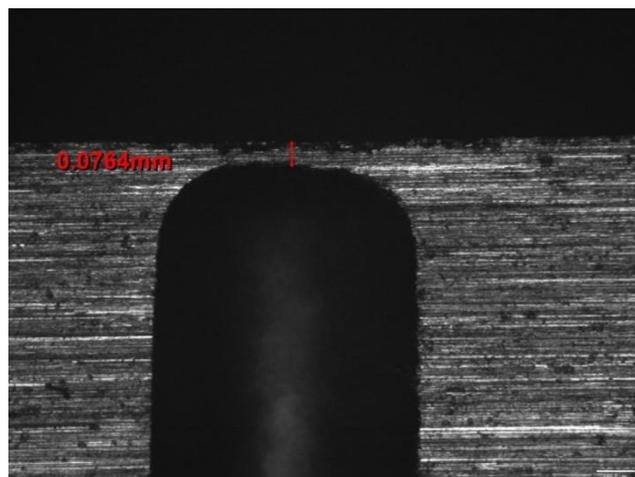


Ilustración 70. Foto y distancia con microscopio

Por último, se anota en la hoja de cálculo de cada pieza usada la distancia final a la superficie correspondiente a cada uno de sus dos agujeros.

11.3.2 Tratamiento de datos

- **Potencias**

Las potencias medidas en cada ensayo se abren con el SW Great, el mismo programa con el que se han recogido los datos, y se filtran con un filtro gaussiano, para eliminar el ruido de las señales. La frecuencia de corte, llamada "Cut off frequency", suele estar entre 1Hz y 10 Hz, dependiendo del ruido de la señal.

En el siguiente ejemplo se puede ver en la imagen A el crudo de una señal de potencias y en la imagen B la misma señal después de aplicarle el filtrado. En este caso la frecuencia de corte con la que se ha filtrado es de 4Hz.

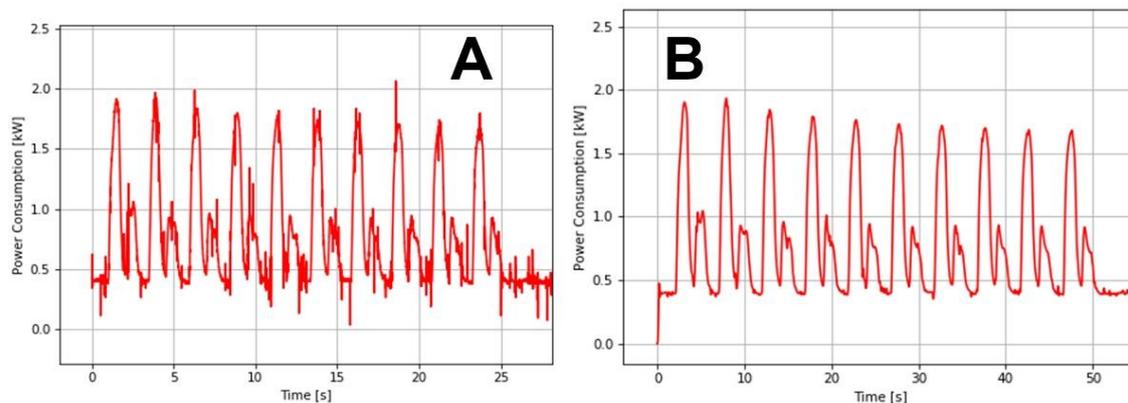


Ilustración 71. Filtrado de potencia con SW Great

Una vez filtrados los datos se apuntan los valores de potencia en cada pasada en el archivo de texto correspondiente a cada ensayo.

- **Cálculo de profundidad de pasada real**

Para saber a qué distancia estaba la fibra de la superficie en cada pasada, y en cada apagado, se calcula la profundidad de pasada real en cada pasada y en cada apagado de chispa. A pesar de haber programado una pasada en la máquina, la profundidad de pasada real no es exactamente la misma siempre, y en los apagados de chispa, es decir, cuando vuelve en la misma cota, también se arranca material acumulado en la pasada.

Para saber a qué distancia se encontraba la fibra en cada pasada y en cada apagado se estima la profundidad de pasada real en cada una de las pasadas y en cada uno de los apagados de chispa. Para eso se hace un reparto de potencias y se distribuye la profundidad de pasada total en función de la potencia que haya consumido esa pasada, o ese apagado.

Para describir mejor el proceso en la *Tabla 10* se han detallado los pasos a seguir.

Tabla 10. Reparto de potencias y cálculo de profundidades reales de pasada

PASADA	TIPO	POTENCIA (KW)	ae (mm)
1	IDA	2,408	0,041
	VUELTA	0,480	0,008
2	IDA	2,200	0,038
	VUELTA	0,430	0,007
3	IDA	2,210	0,038
	VUELTA	0,500	0,009
4	IDA	2,270	0,039
	VUELTA	0,500	0,009
5	IDA	2,280	0,039
	VUELTA	0,500	0,009
6	IDA	2,380	0,041
	VUELTA	0,500	0,009
7	IDA	2,370	0,041
	VUELTA	0,520	0,009
8	IDA	2,390	0,041
	VUELTA	0,530	0,009
9	IDA	2,390	0,041
	VUELTA	0,520	0,009
10	IDA	2,430	0,042
	VUELTA	0,530	0,009
11	IDA	2,430	0,042
	VUELTA	0,540	0,009
12	IDA	2,430	0,042
	VUELTA	0,550	0,009
13	IDA	2,500	0,043
	VUELTA	0,520	0,009
14	IDA	2,480	0,042
	VUELTA	0,560	0,010
15	IDA	2,540	0,043
	VUELTA	0,580	0,010
16	IDA	2,550	0,044
	VUELTA	0,560	0,010
17	IDA	2,580	0,044
	VUELTA	0,570	0,010
TOTAL		249,728	30,851

1. Apuntar los datos de las potencias en cada pasada y en cada apagado de chispa.
2. Sumar todas las potencias, para obtener un valor total de potencia consumida.
3. Apuntar la profundidad total de pasada que ha sido medida con el reloj comparador al final del ensayo, y es la diferencia entre la superficie rectificadora y la referencia dejada a modo de escalón.
4. Relacionar la suma de potencias con la profundidad total de pasada y hacer el reparto proporcionalmente en función de lo que ha consumido cada pasada y cada apagado de chispa.

- **Distancia a la superficie en cada pasada**

Una vez calculadas todas las profundidades de pasada, y sabiendo a qué distancia se ha quedado el agujero en el último pagado de chispa, se puede saber a qué distancia se encontraba el agujero en cada pasada.

Para ello, se empieza desde la distancia a la superficie final medida, y se empieza a sumar todas las pasadas reales calculadas en el paso anterior. Así se puede ir hacia atrás en las pasadas e ir sumando el material eliminado en cada una de ellas para saber a qué distancia del agujero estaba cada una.

En el ejemplo que aparece en la *Tabla 11*, se ha señalado la distancia medida con el microscopio, es decir, la distancia final a la superficie. A esta distancia se le va sumando la profundidad real de cada pasada y cada apagado y así se sabe a qué cota de la superficie de rectificado se encontraba el agujero en cada pasada y en cada apagado de chispa.

Tabla 11. Distancia del agujero a la superficie en cada pasada

PASADA	TIPO	POTENCIA (KW)	ae (mm)	Dist a la superficie
1	IDA	2,408	0,041	0,916
	VUELTA	0,480	0,008	0,908
2	IDA	2,200	0,038	0,870
	VUELTA	0,430	0,007	0,863
3	IDA	2,210	0,038	0,825
	VUELTA	0,500	0,009	0,816
4	IDA	2,270	0,039	0,777
	VUELTA	0,500	0,009	0,769
5	IDA	2,280	0,039	0,730
	VUELTA	0,500	0,009	0,721
6	IDA	2,380	0,041	0,680
	VUELTA	0,500	0,009	0,672
7	IDA	2,370	0,041	0,631
	VUELTA	0,520	0,009	0,622
8	IDA	2,390	0,041	0,582
	VUELTA	0,530	0,009	0,573
9	IDA	2,390	0,041	0,532
	VUELTA	0,520	0,009	0,523
10	IDA	2,430	0,042	0,481
	VUELTA	0,530	0,009	0,472
11	IDA	2,430	0,042	0,430
	VUELTA	0,540	0,009	0,421
12	IDA	2,430	0,042	0,380
	VUELTA	0,550	0,009	0,370
13	IDA	2,500	0,043	0,327
	VUELTA	0,520	0,009	0,319
14	IDA	2,480	0,042	0,276
	VUELTA	0,560	0,010	0,267
15	IDA	2,540	0,043	0,223
	VUELTA	0,580	0,010	0,213
16	IDA	2,550	0,044	0,169
	VUELTA	0,560	0,010	0,160
17	IDA	2,580	0,044	0,116
	VUELTA	0,570	0,010	0,106
TOTAL		49,728	0,851	

- **Fuerzas**

Los datos de las fuerzas recogidos por el programa DynoWare se filtran usando un filtro gaussiano, con el programa SW Great, como la potencia. La frecuencia de corte para el filtro está entre 1Hz y 10 Hz, pero por lo general se va probando de la frecuencia más alta a la más baja, hasta ver con qué valor se elimina el ruido, pero sin llegar a eliminar información necesaria.

Al cargar las señales en crudo obtenidas con el DynoWare, el SW Great diferencia la fuerza tangencial y la fuerza normal, tal y como se ve el siguiente ejemplo.

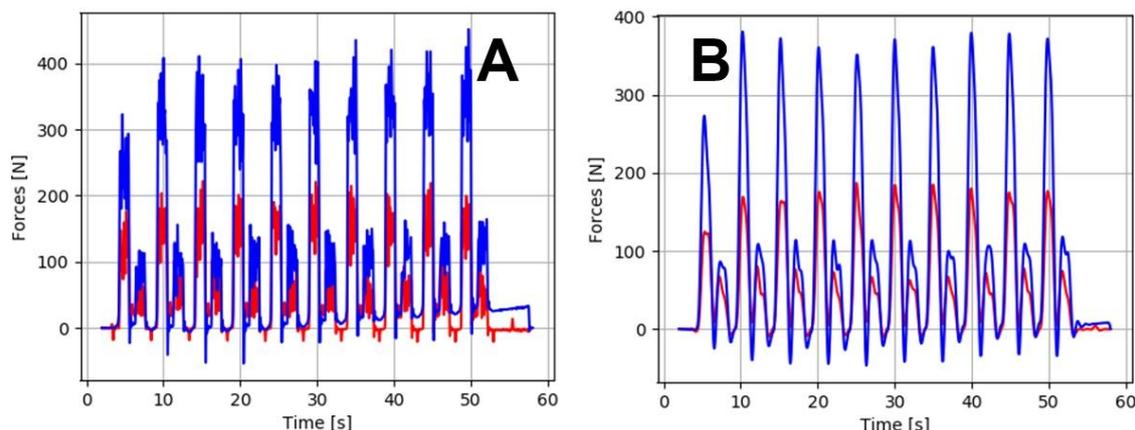


Ilustración 72. Filtrado de fuerzas con SW Great

En la *Ilustración 72* se muestra un filtrado de fuerzas. En este caso la fuerza representada con el color azul corresponde a la fuerza normal y la fuerza representada en rojo es la fuerza tangencial.

11.3.3 Temperaturas

Debido al peso que tiene en este proyecto la monitorización y el tratamiento de datos de temperaturas se ha decidido reservar este apartado para definir el tratamiento de señales recogidas por los pirómetros.

Los pirómetros transforman los impulsos de luz captados en señal de voltaje. Estos datos se guardan en un archivo de texto, de 4 columnas y cada columna corresponde a las lecturas de un canal.

Como lo que se quiere conseguir son datos de temperaturas se ha escrito un programa en MATLAB que usa la calibración de cada pirómetro para devolver las señales de temperaturas.

- **Calibración de pirómetros**

Los pirómetros se han calibrado en un horno de calibración JOFRA. Para ello se ha controlado la temperatura y se ha ido anotando las lecturas de los canales. Después se hace el cociente entre los dos canales, porque, como ya se ha mencionado anteriormente, son pirómetros dicromáticos y al hacer la división se anula la emisividad del material y así no afecta a la lectura.

Tabla 12. Calibración del módulo 1

MÓDULO 1				
Vel. Lec [Hz]	Temperatura [°C]	Canal 1	Canal 2	C1/C2
5000	300	64,0156	18,4241	3,47455778
5000	320	63,9111	20,0039	3,19493199
5000	350	65,0624	21,9313	2,96664584
5000	400	79,8433	34,6959	2,30123156
5000	450	93,8946	52,3808	1,79253849
5000	500	157,413	133,879	1,1757856
5000	550	230,192	260,226	0,88458494
5000	600	341,322	497,576	0,68596958
5000	650	499,098	890,298	0,56059656
5000	700	709,526	1515,32	0,46823509
5000	750	943,398	2297,45	0,41062831
5000	800	1314,09	3742,88	0,3510906
5000	850	1755,32	5554,02	0,31604495
5000	900	2258,38	8029,16	0,28127226
5000	950	2859,46	11232,5	0,25457022
5000	1000	3582,5	15529,8	0,23068552
5000	1050	4521,64	21511	0,21020129
5000	1100	5732,45	30354,9	0,1888476

Tabla 13. Calibración módulo 2

MÓDULO 2				
Vel.Lec [Hz]	Temperatura [°C]	Canal 3	Canal 4	C3/C4
5000	300	62,5436	19,4677	3,21268563
5000	320	63,4837	21,1613	2,99999055
5000	350	69,1178	24,1034	2,86755396
5000	400	73,4829	31,4374	2,33743567
5000	450	113,245	69,1406	1,63789438
5000	500	166,725	141,699	1,17661381
5000	550	248,078	281,584	0,88100886
5000	600	371,259	535,136	0,6937657
5000	650	540,148	971,521	0,55598181
5000	700	770,442	1616,54	0,4765994
5000	750	1045,35	2564,68	0,40759471
5000	800	1437,99	4050,11	0,35504962
5000	850	1932,12	6133,44	0,31501409
5000	900	2443,15	8676,41	0,28158536
5000	950	3131,68	12316,2	0,25427323
5000	1000	3925,03	16976,9	0,23119828
5000	1050	4959,95	23761,6	0,20873805
5000	1100	6208,43	32228,2	0,19263968

Con estas calibraciones se puede relacionar el cociente de los canales de cada pirómetro con la temperatura correspondiente, y así poder interpolar los datos recogidos en los ensayos y conseguir los datos de temperaturas.

En la siguiente gráfica se observa que las calibraciones de ambos pirómetros son similares, y que la relación entre los dos canales de cada módulo corresponde prácticamente a la misma temperatura.

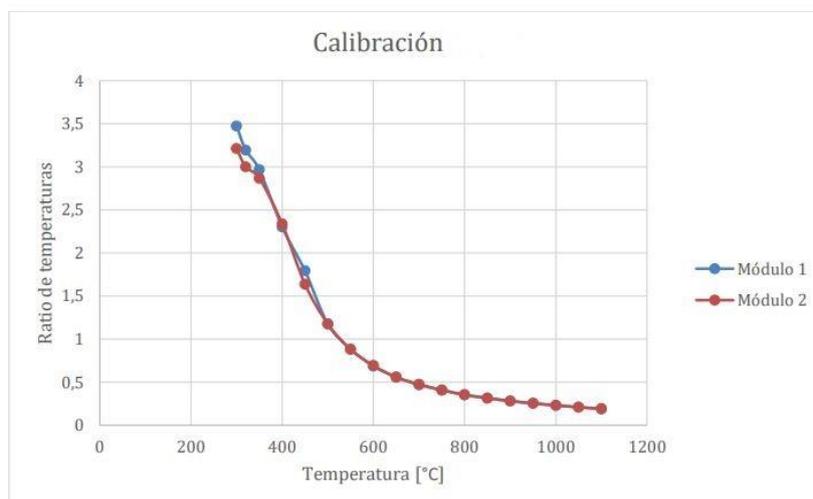


Ilustración 73. Calibración de los módulos

- **Obtención de temperaturas**

Para comparar las señales de voltaje que recogen los pirómetros con las calibraciones, y así transformarlas en valores de temperaturas, se ha escrito un programa en MATLAB (ANEXO 1) que sigue los siguientes pasos:

1. Se introduce el archivo de texto con las lecturas de los canales en crudo
2. Se guardan los canales en variables diferentes y se hace un filtrado usando una media móvil con los datos cercanos.
3. Se hace la relación de los canales 1 y 2, pertenecientes al módulo 1, y de los canales 3 y 4, pertenecientes al módulo 2.
4. Se interpola cada relación con su calibración correspondiente para obtener las temperaturas.
5. Por último, se grafican las dos señales en función del tiempo.

- **Representación de temperaturas**

A continuación se muestran ejemplos de las gráficas de temperaturas obtenidas de diferentes ensayos. En las gráficas se representan las lecturas de los dos pirómetros.

En la *Ilustración 74 A* se muestra la gráfica del ensayo preliminar en seco. Hay en un punto donde la temperatura comienza a descender (marcado con rojo), porque se descubrieron los agujeros. En esta gráfica, además de las pasadas, también se pueden ver los apagados de chispa.

En las gráficas B, C y D de la *Ilustración 74* se muestran las lecturas de temperaturas de los ensayos con taladrina mal posicionada, con taladrina bien posicionada con boquillas redonda y plana, respectivamente.

A pesar de que son gráficas representativas, y en ellas se ve la influencia del fluido refrigerante, no son gráficas comparables porque es necesario recordar que cada temperatura obtenida esta a una distancia de la superficie, y las distancias varían según el ensayo, ya que cada pieza tiene una distancia distinta.

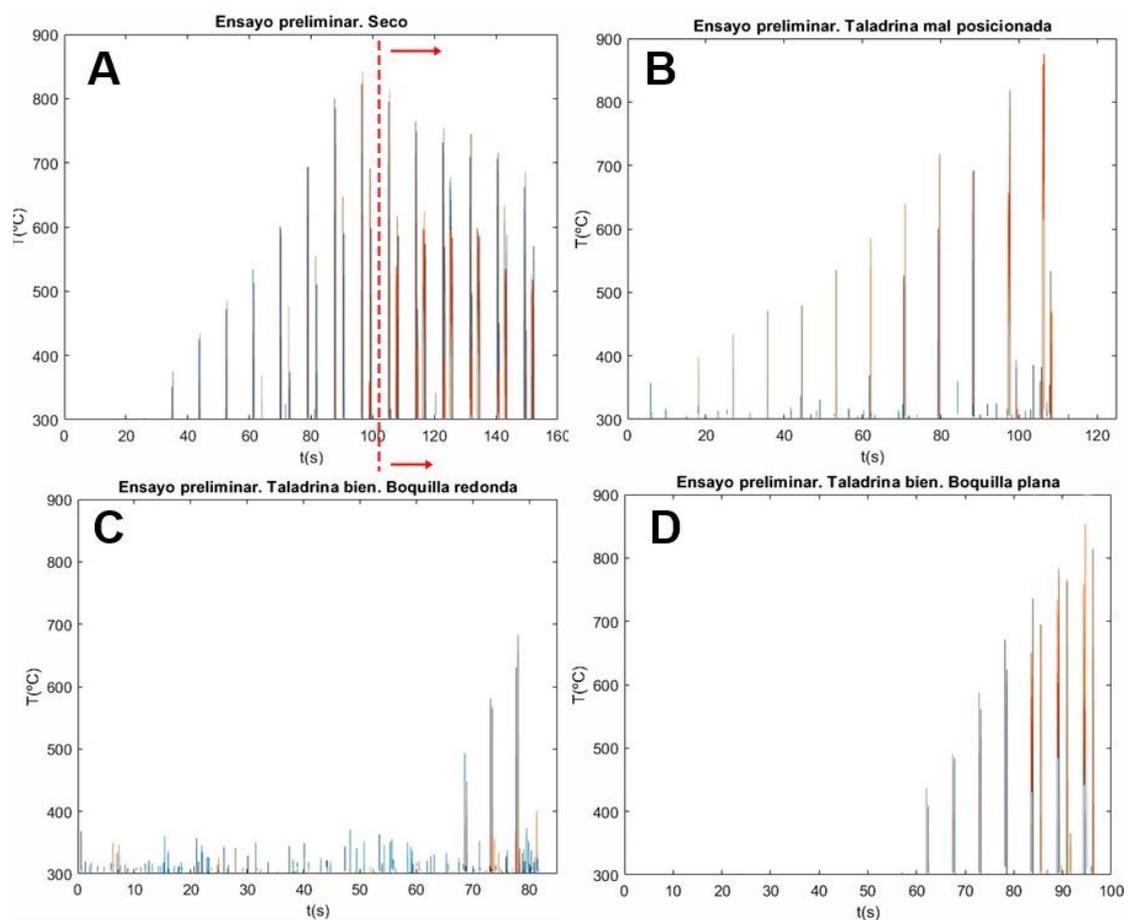


Ilustración 74. Gráficas de temperaturas de ensayos preliminares

12. Diagrama de Gantt

En este apartado se muestra un cronograma para exponer el tiempo de dedicación para las diferentes tareas del proyecto.

Fases y tareas \ Semanas	Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
	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	36
Fase 1: Formación																																				
Formación práctica																																				
Formación teórica																																				
Fase 2: Desarrollo del proyecto																																				
Planteamiento de ensayos																																				
Disposición del equipo																																				
Preparación de piezas																																				
Fase 3: Ejecución de ensayos																																				
Ensayos preliminares																																				
Ensayos																																				
Fase 4: Tratamiento de datos y análisis de resultados																																				
Tratamiento de datos																																				
Análisis de resultados y conclusiones																																				
Fase 5: Redacción del proyecto																																				
Redacción de los documentos																																				

Tabla 14. Diagrama de Gantt

13. Resultados

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos durante los ensayos. Primero se muestran los resultados de los ensayos preliminares, y después, como consecuencia de estos ensayos y de a necesidad industrial, se definen los ensayos finales y sus resultados.

13.1 Resultados preliminares

Los resultados que se presentan a continuación son los conseguidos durante los ensayos preliminares. Los parámetros y las variables del proceso han sido las siguientes:

Tabla 15. Parámetros reales de los ensayos preliminares

Parámetro/ Variable	Valor
$a_{e\text{ REAL}}$	0,039mm
v_s	30m/s
v_w	5000mm/min
q_s	360
$Q_w' \text{ REAL}$	3,25 mm ³ /mm·s

La profundidad de pasada real es la media de las profundidades de pasada reales. Esta profundidades se han calculado haciendo una repartición de potencia, tal y como se ha explicado en el tratamiento de datos. De esta forma, también se calcula el caudal específico de viruta real.

En los resultados se muestran las cuatro configuraciones de refrigeración mencionadas anteriormente. Por una parte se han realizado ensayos en seco, es decir, sin fluido de corte, y por otra parte, con fluido de corte mal posicionado (*Ilustración 64. Boquilla mal posicionada*) y bien posicionado (*Ilustración 63. Boquillas bien posicionadas*). Las características de las distintas refrigeraciones son las siguientes:

Tabla 16. Características de la refrigeración

	Dimensiones (mm)	Área (mm ²)	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)
Taladrina mal posicionada / Taladrina bien posiconada (Boquilla redonda)	61x2,9	176,9	0,92	5,23
Taladrina bien posicionada (Boquilla plana)	Ø 6	28,3	0,55	19,45

- **Potencias**

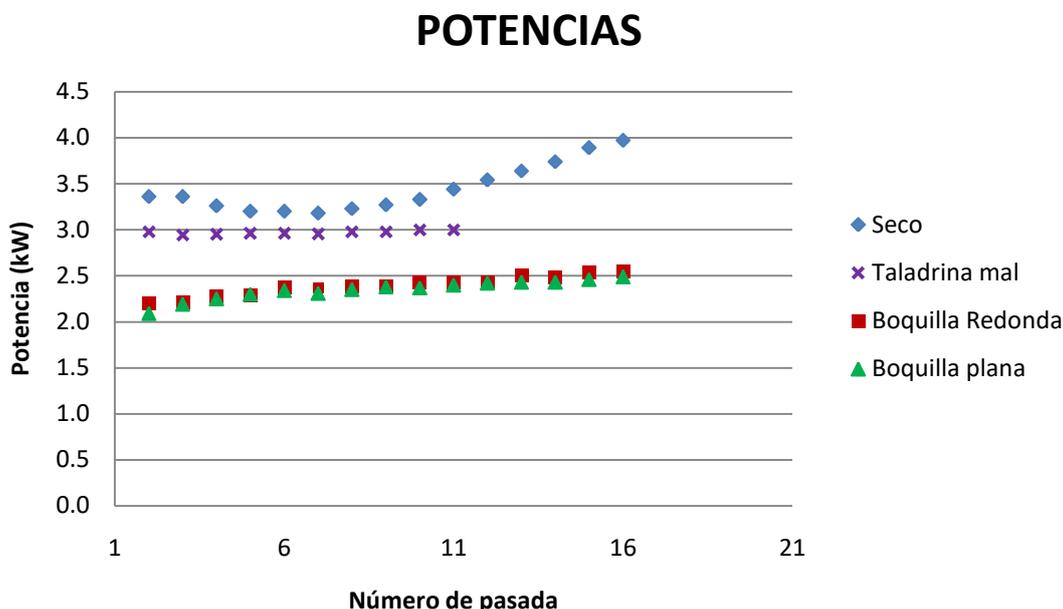


Ilustración 75. Gráfica de potencias de ensayos preliminares

Por una parte, en la gráfica se observa que el consumo de potencia es mayor y menos estable cuando no hay fluido de corte (azul). Esto se debe a que el fluido de corte ayuda en el arranque de material, lubricando la zona. También se ve que a medida que aumentan las pasadas la potencia empieza a tener una tendencia creciente, lo que seguramente indique que la muela se ha embotado, es decir, se le ha pegado material. La taladrina también ayuda en la limpieza de la muela, y hace que se embote menos.

Comparando las potencias en seco y con la taladrina mal posicionada, se observa que la potencia es menor y está estabilizada cuando hay fluido de corte. Esto se debe a que la taladrina lubrica el punto de corte, y mejora la limpieza de la muela y la evacuación de la viruta.

Por otra parte, comparando los valores de las potencias con el fluido de corte bien posicionado, se observa que se consume la misma potencia con la boquilla redonda con la boquilla plana. A pesar de esto las potencias consumidas con la taladrina bien posicionada es menor que en seco y que con la taladrina mal posicionada. Esto quiere decir que el posicionamiento de la taladrina influye en el consumo de potencia, porque se reduce el consumo de potencia en casi un 20% cuando la taladrina está más cerca del punto de corte, tanto para la boquilla redonda como la boquilla plana.

- **Fuerzas**

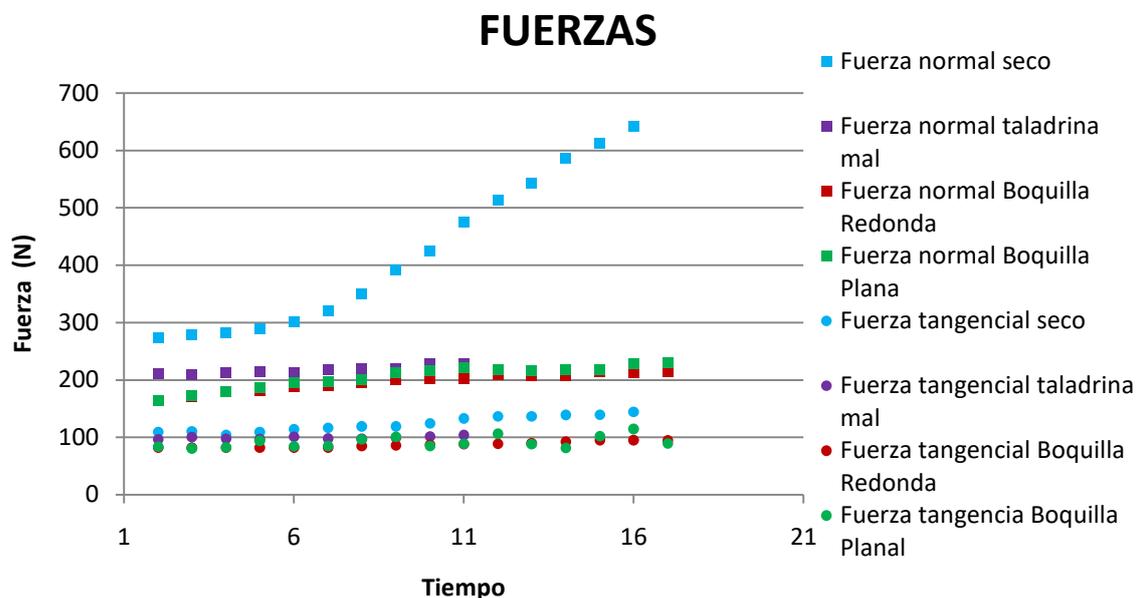


Ilustración 76. Resultados de fuerzas de los ensayos preliminares

En la *Ilustración 76* se muestran las fuerzas normales y tangenciales obtenidas en los ensayos preliminares. Las fuerzas, tanto normal como tangenciales, son similares cuando hay fluido de corte. En este caso, no hay diferencia entre la taladrina bien posicionada y mal posicionada. Ambas fuerzas son constantes con fluido de corte, lo que quiere decir que el coeficiente de rozamiento también es constante, por lo que la fricción entre la muela y la pieza no varía con las pasadas. Esto quiere decir que la lubricación es importante durante el rectificado para mejorar el rozamiento en el punto de contacto y evitar que se embote la muela y se reduzca el coeficiente de rozamiento.

Las fuerzas medidas durante el ensayo en seco se distinguen de las medidas con fluido de corte. La fuerza normal medida en seco es superior a las fuerzas normales con fluido de corte y a medida que aumentan las pasadas se dispara. La fuerza tangencial en seco es más constante que la normal, pero también comienza a tener una tendencia creciente, aunque no tan ascendente como la de la fuerza normal.

Este crecimiento de la fuerza normal indica que el coeficiente de rozamiento disminuye a medida que aumentan las pasadas, por lo que la muela se embota y comienza a deslizar. Este es un gran problema durante el rectificado en seco, ya que el fluido de corte mejora la limpieza de la muela, y disminuye el embotamiento de la muela.

• **Temperaturas**

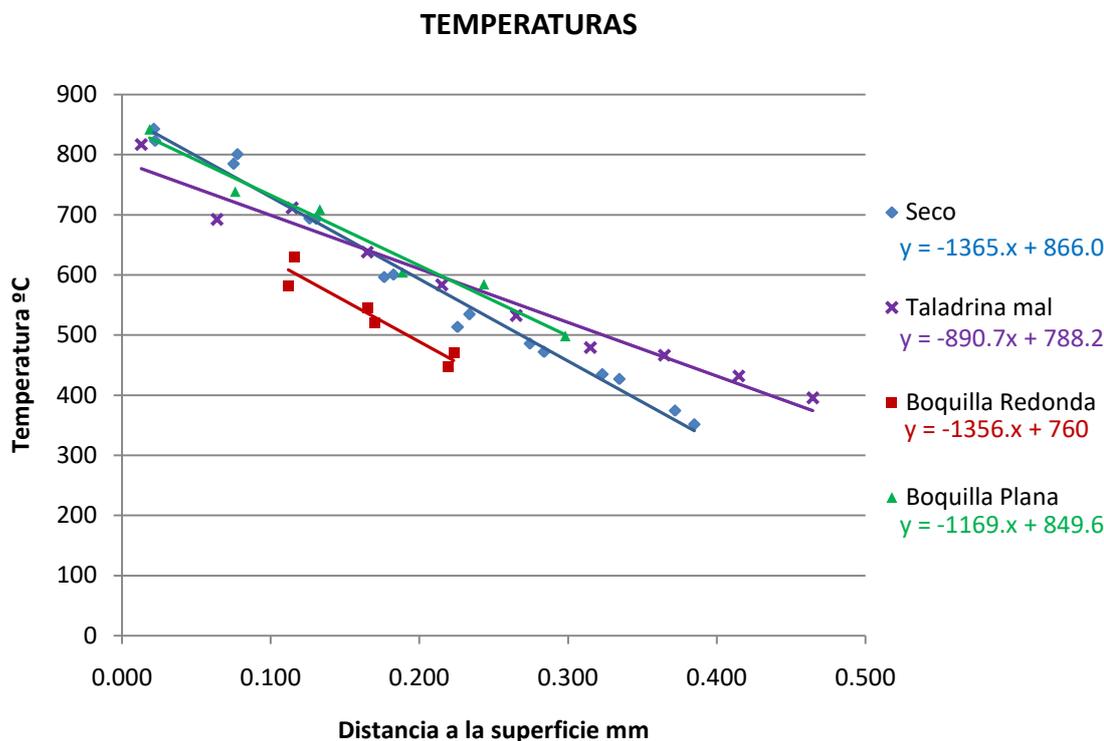


Ilustración 77. Temperaturas de los ensayos preliminares

En la *Ilustración 77* se muestran las temperaturas obtenidas en los diferentes ensayos preliminares en función de la distancia a la superficie que se ha medido cada temperatura.

Como se puede ver todas las líneas de tendencia tienen pendiente negativa, es decir, cuanto más distancia hay desde la medición a la superficie menor es la temperatura. Esto se debe a que cuanto más material haya entre la fibra y la superficie que se rectifica menor será la luz que llegue hasta las fibras, y por tanto menor será la señal recogida por los pirómetros.

La línea de tendencia más pronunciada es la que corresponde al ensayo en seco (azul), lo que quiere decir que se calienta más rápido que las demás y que no se enfría, es decir, que como no hay fluido de corte la pieza no se enfría entre pasada y pasada, o no se enfría tanto. También es la línea con más puntos, lo que quiere decir que desde las primeras pasadas la pieza se calienta lo suficiente como para que los pirómetros sean capaces de captar señales.

La tendencia de los datos con la taladrina mal posicionada (línea morada) es menos empinada que en seco, lo que marca una clara influencia del fluido de corte en el enfriamiento de la pieza. Comparando esta línea de tendencia (morada) con la que se obtiene del ensayo con la taladrina bien posicionada y boquilla plana (línea verde), se observa que con la boquilla plana (verde) se calienta más rápido, ya que tiene más pendiente. Sin embargo, hay que tener en

cuenta que se recogen menos puntos que con la taladrina mal puesta, es decir, el calor no llega a la fibra a tanta distancia como con la taladrina mal puesta. También, una posible explicación a que se caliente más con la taladrina mejor posicionada es que con una mejor lubricación durante las pasadas se arranque más material y por eso se genere más calor.

La recta sacada con los puntos obtenidos durante el ensayo con la taladrina bien posicionada y la boquilla tiene una pendiente similar a la línea de tendencia del ensayo en seco, sin embargo comienza de mucho más abajo, lo que indica que las temperaturas recogidas son mucho menores. Además, esta curva es la que comienza más a la izquierda, por lo que la fibra no es capaz de captar luz hasta estar más cerca de la superficie, y es la curva con menos puntos, es decir, que no se han medido tantas temperaturas, y por tanto no se transmite tanto calor a la pieza.

Comparando los casos con la taladrina bien posicionada (roja y verde), se ve que la boquilla redonda (roja) tiene mayor capacidad de refrigeración que la boquilla plana. Esto se debe a que, a pesar de que la boquilla plana entregue más caudal en el punto de corte, la boquilla redonda proporciona un chorro con mayor velocidad. Esto concuerda con lo visto en la revisión bibliográfica, donde se dice que la velocidad del chorro tiene más influencia que el caudal.

13.2 Resultados finales

Como resultado de los ensayos preliminares y, por las necesidades industriales, se han realizado unos ensayos finales.

13.2.1 Definición de ensayos finales

Desde IDEKO se han definido tres tipos de ensayos finales. Los parámetros de estos ensayos parten de unos parámetros y variables en común: $Q_w' = 2$, $b_w = 15\text{mm}$, $V_s = 20\text{m/s}$. De estos se han obtenido el resto de parámetros y variables para definir los ensayos finales, que son los siguientes.

Tabla 17. Parámetros y variables de los ensayos finales

	$Q_w' [\text{mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})]$	$V_s [\text{m/s}]$	$a_e [\text{mm}]$	$V_w [\text{m/s}]$	q_s	$b_w [\text{mm}]$
Tipo 1	2	20	0,250	480	2500	15
Tipo 2	2	20	0,050	2400	500	15
Tipo 3	2	20	0,025	4800	250	15

Cada tipo de ensayo se realiza sin fluido de corte, con la boquilla redonda y con la boquilla plana. Es decir, por cada ensayo hay 3 variables diferentes y se hacen 10 pasadas en cada uno.

Se ha tomado la decisión de no repetir la taladrina mal posicionada, con el chorro alejado, como se ha hecho en los ensayos preliminares, porque no se puede cuantificar como de "mal posicionada está la taladrina" y por tanto no se puede comparar con los demás.

13.2.2 Resultados

- **Potencia**

Ensayo tipo 1:

La profundidad de pasada programada en la máquina es de 250micras, sin embargo la profundidad de pasada real en seco y con la boquilla redonda ha sido 187 micras y con la boquilla plana 186 micras. Por lo que en las pasadas se elimina el 74,8% de la profundidad programada y el resto de material se elimina en el apagado de chispa.

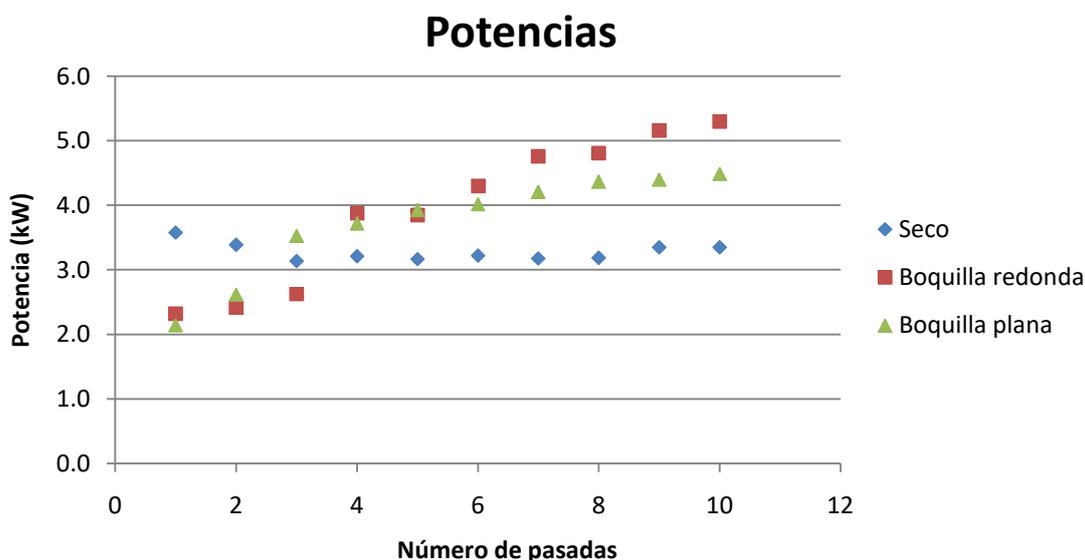


Ilustración 78. Potencias ensayos finales tipo 1

En la *Ilustración 78* se muestran las potencias obtenidas durante los ensayos tipo 1. Es inusual que el ensayo en seco sea el que menos potencia consuma, pero esto se debe a que la temperatura generada durante el ensayo era tan alta que la pieza perdió dureza. Es decir, el acero estaba incandescente y por tanto la pieza de volvió más blanda porque al calentar mucho una pieza ya templada (revenido) su dureza disminuye considerablemente (*Ilustración 89*), y el material es más fácil de arrancar. Esto hizo que se consumiera menos potencia.

Comparando los resultados de potencias obtenidos con fluido de corte se ve que ambos son similares y con tendencia creciente. Esta tendencia se puede deber a que, como la profundidad de pasada es muy grande, posiblemente se acumule material a medida que aumentan las pasadas, y por eso al final se consume más potencia.

Ensayo **tipo 2**:

La profundidad de pasada programada en la máquina para los ensayos de tipo 2 es de 50micras, sin embargo la profundidad de pasada real en seco ha sido de 35micras y con taladrina ha sido, en ambos casos, 36micras. Esto quiere decir que con taladrina se elimina un 72% de la profundidad de pasada teórica y en seco un 70%. El resto de material se elimina en los apagados de chispa.

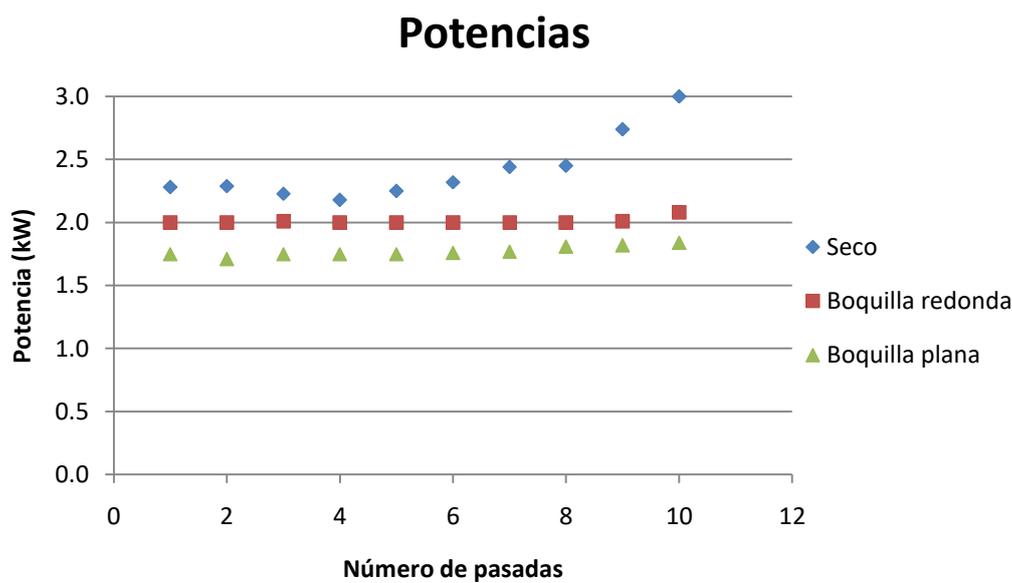


Ilustración 79. Potencias ensayos finales tipo 2

Las potencias recogidas durante el ensayo en seco son más altas que cuando hay fluido de corte, lo que indica que, como ya se ha mencionado antes, el fluido de corte lubrica la superficie rectificada, mejorando el contacto grano-pieza y ayudando a la eliminación del material.

También se observa que las potencias del ensayo en seco no tienden a estabilizarse, como ocurre en los ensayos con fluido de corte, que las potencias prácticamente no varían. Esto se deba seguramente a que con la ausencia de fluido de corte la evacuación de viruta es más difícil y se queda el material adherido a la muela, en los huecos entre la superficie de la muela y los granos, es decir, se embota la muela. Esto hace que la superficie de contacto sea más grande y por tanto se consuma más potencia.

Los resultados de potencias con fluido de corte son similares y constantes. Con la boquilla plana se ha consumido un 17,5% menos de potencia que con la boquilla redonda, lo que puede indicar que la forma en la que se entrega el fluido en la zona de corte hace que el chorro, que en este caso es como una lámina por la forma de la boquilla, entra mejor en la zona de contacto y lubrica mejor.

Ensayo **tipo 3**:

La profundidad de pasada programada teórica que se ha programado en la máquina es de 25micras, sin embargo la profundidad de pasada real en seco ha sido de 18micras y con taladrina ha sido, en ambos casos, 17micras.

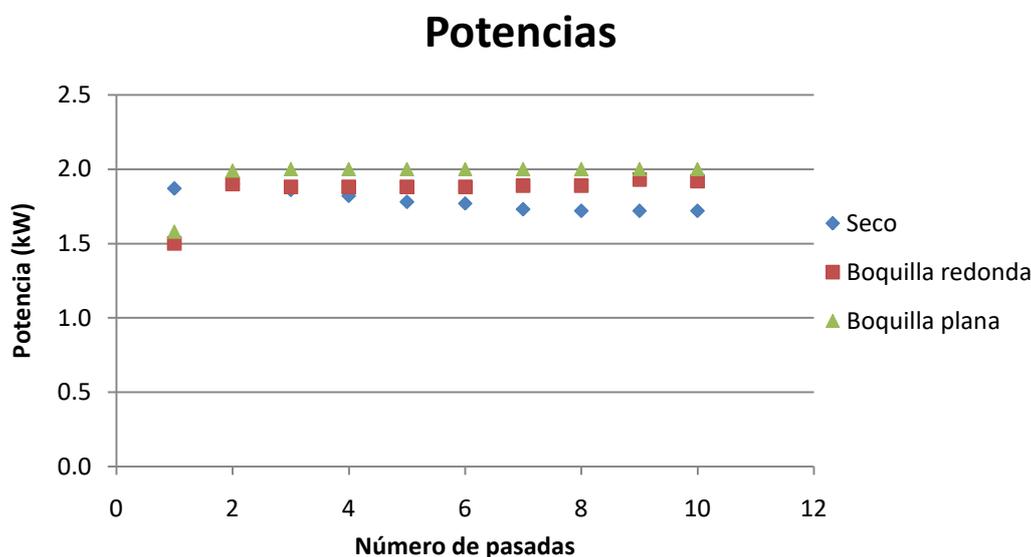


Ilustración 80. Potencias ensayos finales tipo 3

En la gráfica de potencias de los ensayos finales del tercer tipo (*Ilustración 80*) se observa que las potencias en los ensayos con taladrina son similares, por lo que no hay diferencias entre las dos boquillas. En ambos casos se consume menos potencia en la primera pasada, un fenómeno muy habitual puesto que en la primera pasada no se ha acumulado material y la superficie esta previamente rectificadas.

Sin embargo, durante el ensayo en seco las potencias se llegan a estabilizar, no como en el ensayo en seco tipo 2, que tiene una tendencia creciente, ni como en el ensayo en seco tipo 1, donde la potencia es constante y menor que con fluido de corte porque la pieza se funde.

También se puede ver que en seco las potencias son ligeramente menores que con fluido de corte. Puede ser que la muela se embote y pierda sus capacidades abrasivas, genere menos fuerza tangencial, es decir, arranque menos material y consuma menos potencia. En cambio, puede ser que con estos parámetros el rectificado en seco sea viable, desde un punto de vista de consumo energético.

- **Coefficiente de rozamiento**

En lugar de presentar los resultados de las fuerzas normales y tangenciales, al igual que se ha hecho en los ensayos preliminares, se ha decidido presentar los resultados de la relación de las fuerzas, es decir, del coeficiente de rozamiento, porque se ha considerado que son unos resultados más representativos que las fuerzas.

Ensayo tipo 1:

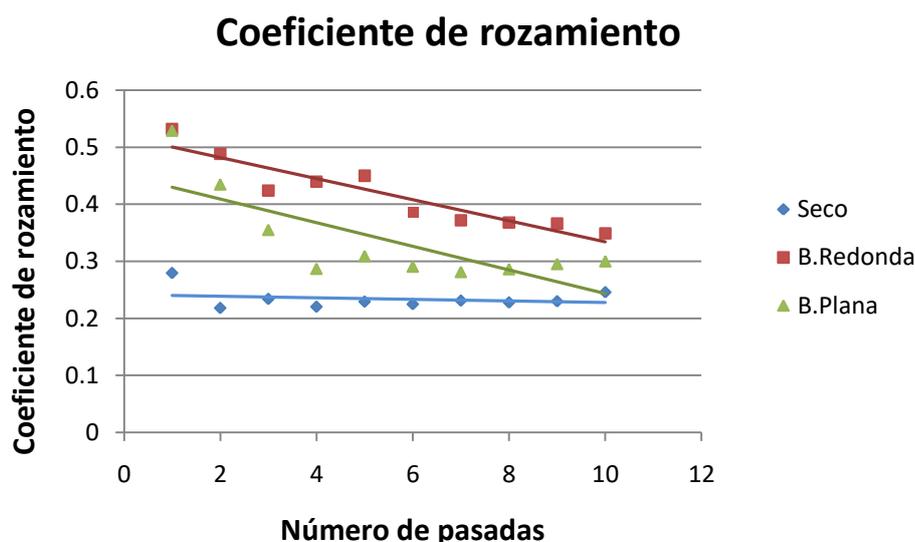


Ilustración 81. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 1

En la *Ilustración 80* se muestra el coeficiente de rozamiento de los ensayos tipo 1. Por una parte, en los resultados del ensayo en seco se ve que la tendencia es completamente lineal, lo que indica que el coeficiente de rozamiento no varía. Esto se debe a que, como ya se ha señalado antes, durante el ensayo en seco de este tipo de ensayo final los parámetros eran tan bruscos y agresivos que el punto de contacto estaba al rojo vivo, y la pieza, que esta previamente templada, perdió dureza al calentarla tanto de nuevo. Por eso el rozamiento que se generaba no es muy alto, porque la pieza estaba blanda.

Por otra parte, se ve que la tendencia del coeficiente de rozamiento es la misma en los ensayos con taladrina. Es normal que al principio la fricción sea mayor y que a medida que se hacen pasadas se comience a deslizar, porque los parámetros son muy agresivos y posiblemente, aún con fluido de corte, la muela se embote y pierda sus propiedades abrasivas.

Asimismo, se observa que con la boquilla redonda el coeficiente de rozamiento, a pesar de que tenga la misma tendencia, es un 16% mayor que con la boquilla plana, lo que indica que arranca material de forma más óptima, y desliza menos.

Ensayo tipo 2:

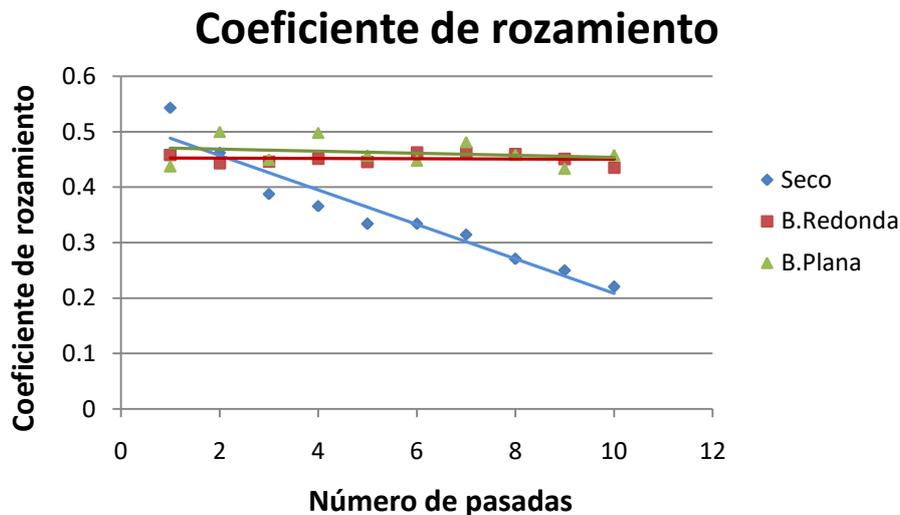


Ilustración 82. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 2

En la *Ilustración 82* se observa como durante el ensayo en seco el coeficiente de rozamiento tiene una tendencia decreciente, es decir, su valor se reduce a medida que se hacen las pasadas. Esto quiere decir que al principio hay más rozamiento en el contacto entre la muela y la pieza, pero según avanza el ensayo comienza a deslizar. Posiblemente se deba a un embotamiento de la muela, debido a la mala evacuación de la viruta por no haber fluido refrigerante.

Sin embargo, se ve una clara influencia de la refrigeración en las dos líneas de tendencia, con la boquilla redonda y con la boquilla plana, porque el coeficiente de rozamiento se mantiene constante, es decir, que las rectas tienen pendiente casi nula. Lo que indica que la muela no se embota, porque sigue habiendo la misma fricción todo el rato, y que la viruta se evacua de manera correcta.

Ensayo tipo 3:

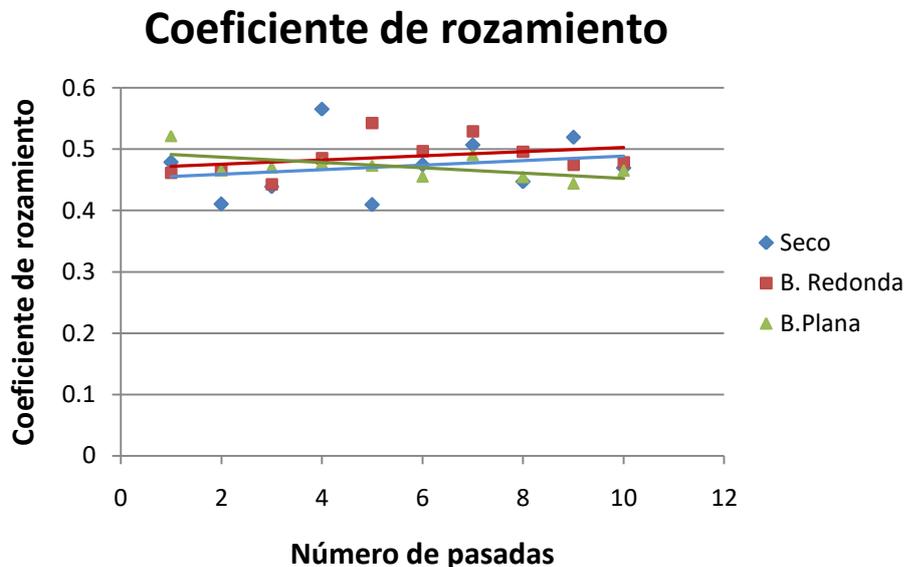


Ilustración 83. Coeficiente de rozamiento ensayos finales tipo 3

En los resultados del coeficiente de rozamiento de los ensayos finales tipo 3, mostrados en la *Ilustración 83*, se ve que apenas hay diferencia en la variación del coeficiente de rozamiento, ni para el ensayo en seco, ni para los ensayos con fluido de corte. Se puede ver que en seco y con la boquilla redonda la tendencia es prácticamente la misma, y que tienen las rectas una ligera pendiente positiva. Sin embargo la línea de tendencia de la boquilla plana tiene una pequeña pendiente negativa. Esta diferencia posiblemente sea despreciable, debido a que la variación es muy pequeña.

Como los resultados de los coeficientes de rozamiento son parecidos en estos ensayos finales tipo 3, se puede determinar que la influencia de la refrigeración varía según los parámetros de los procesos.

- **Temperaturas**

Ensayo tipo 1:

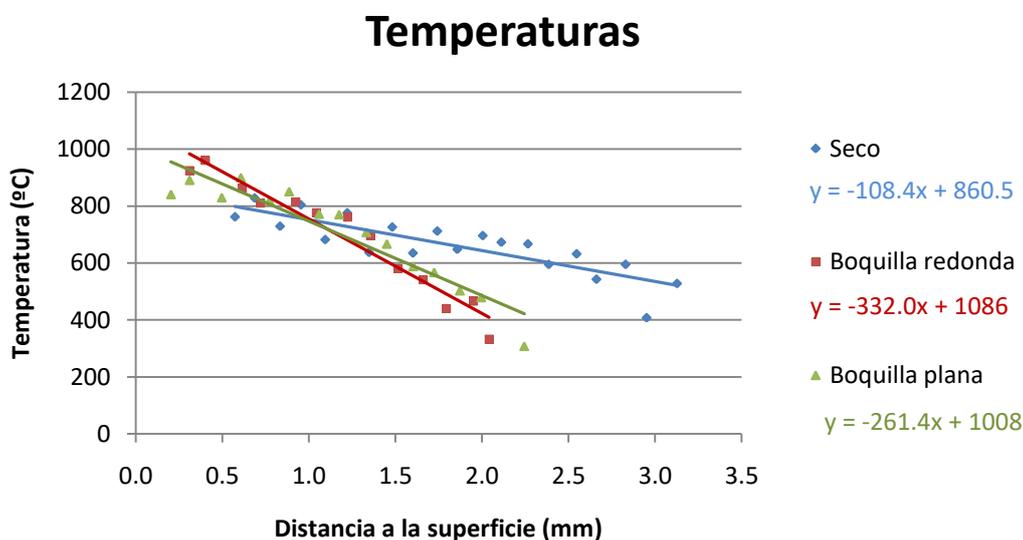


Ilustración 84. Temperaturas ensayos finales tipo 1

En la *Ilustración 84* se han representado las temperaturas medidas en los ensayos finales tipo 1, en función de a qué distancia de la superficie de contacto se encontraba la fibra en el momento de esa medición.

La línea de tendencia azul representa el ensayo en seco, y es la recta que más puntos tiene, porque como no hay fluido de corte se evacua más calor por la pieza y se recogen más datos de temperatura.

Al comienzo de las pasadas (puntos situados más a la derecha), la recta azul supera los está por encima de las rectas de los ensayos con fluido de corte (rectas roja y verde). Sin embargo, luego las temperaturas con fluido de corte superan a las de seco. Esto se debe a que los parámetros del proceso eran tan bruscos que en el punto de corte el acero estaba al rojo vivo y la pieza perdió dureza debido a las altas temperaturas, dejando rebabas en la pieza después del ensayo (*Ilustración 89*). De esta forma la fricción en seco era menor (*Ilustración 81*), y por tanto se generaba menos calor con fluido de corte. Además, en los ensayos con fluido de corte se ha conseguido hacer mediciones más próximas al punto de contacto, es decir, hay más puntos hacia la izquierda en el gráfico donde la distancia es menor. Esto hace que las temperaturas con fluido de corte también sean mayores.

Comparando las líneas de tendencia de los ensayos con las diferentes boquillas se puede ver que las tendencias son similares y que apenas hay variación de una boquilla a otra.

Ensayo tipo 2:

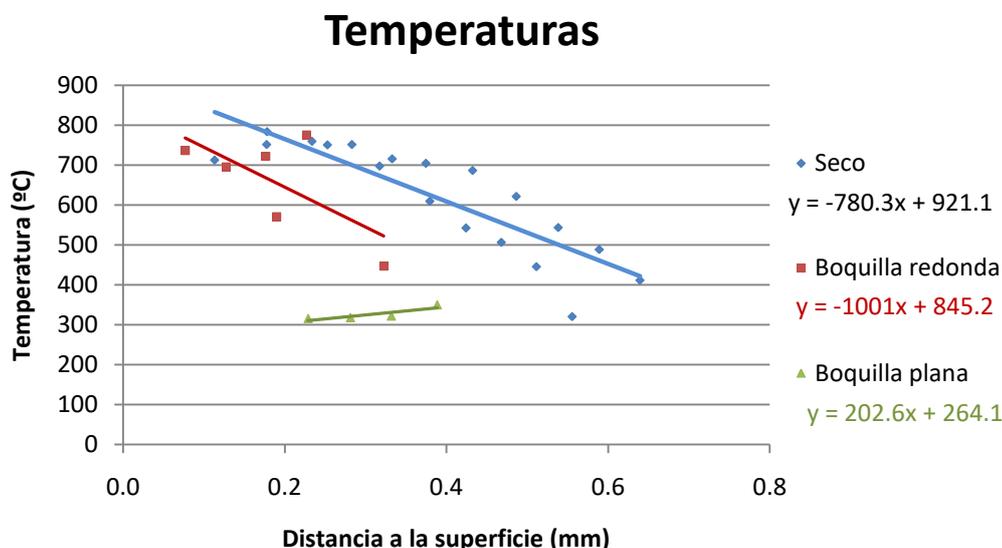


Ilustración 85. Temperaturas ensayos finales tipo 2

En las mediciones de temperaturas de los ensayos finales tipo 2 representadas en la gráfica (*Ilustración 85*), se observa que los resultados obtenidos durante el ensayo con fluido de corte y boquilla plana no son concluyentes (recta representada en verde), puesto que se han recogido pocas mediciones y la tendencia es ascendente según se hace más grande la distancia entre la fibra y la superficie, lo que carece de sentido.

La recta representada en azul corresponde al ensayo sin fluido refrigerante, y tiene un poco menos de inclinación que la recta roja, la cual hace referencia a las temperaturas medidas con fluido de corte y la boquilla redonda. La recta azul se encuentra por encima de la curva roja, lo que indica que las temperaturas en seco son más elevadas que con fluido de corte, y que la diferencia de temperaturas será el calor evacuado por la taladrina.

También hay que tener en cuenta que para realizar mediciones con fluido de corte es necesario estar más cerca del punto de contacto, lo que indica que el fluido hace que calor se expanda menos. Por el contrario, en el ensayo en seco hay más mediciones y a una distancia a la superficie mayor, lo que indica que el calor se queda en la pieza y se expande hasta una mayor distancia, pudiendo medir temperaturas desde más lejos.

Ensayo **tipo 3**:

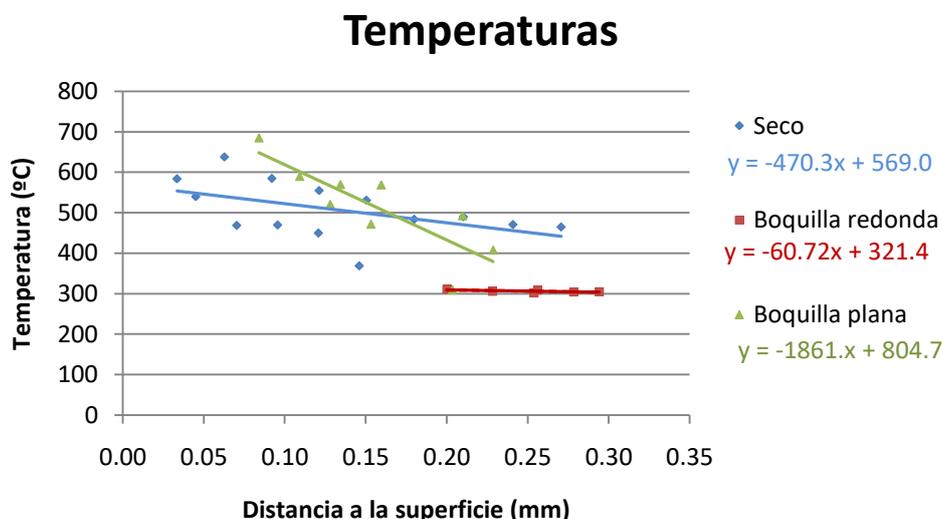


Ilustración 86. Temperaturas ensayos finales tipo 3

En la *Ilustración 86* se han representado los datos y temperaturas, y la distancia a la superficie a la que se ha medido cada uno, durante los ensayos finales tipo 3.

Comparando las líneas de tendencia se ve como con la boquilla redonda (recta representada en rojo) las temperaturas no son tan elevadas como con la boquilla plana o sin fluido de corte. Esto posiblemente se deba a la influencia de la velocidad del chorro, porque con la boquilla redonda se entre menos caudal que con la plana, pero a más velocidad (*Tabla 16*). Como se ha visto en la revisión bibliográfica, la velocidad de salida del chorro tiene mayor peso a la hora de refrigerar la zona de contacto que el caudal, por lo que una velocidad de chorro mayor es más eficaz que un caudal mayor, y así es sistema de refrigeración será más óptimo.

También se puede observar que, al igual que en los demás resultados de temperaturas, el ensayo en seco es el que más puntos tiene. De esto se puede deducir que el calor es capaz de penetrar más cuando no hay fluido de corte, y por eso se pueden captar mediciones de temperatura estando más lejos de la superficie.

- **Piezas**

Como el daño térmico de las piezas se puede detectar haciendo una inspección visual, en este apartado se van a mostrar las imágenes del estado de las piezas después de los ensayos.

Ensayo tipo 1:

En la *Ilustración 87* se observa el daño térmico sufrido por las piezas por la evacuación de calor por el material. La pieza del ensayo sin fluido de corte está completamente decolorada y oxidada. Esto se debe a que debido a las altas temperaturas que se han dado durante el ensayo la pieza ha sufrido una oxidación acelerada y se ha decolorado toda la superficie de rectificado. Las otras dos piezas también tienen una gran decoloración en la superficie, pero es mucho más notable en la pieza que se ha rectificado sin fluido de corte. Esto quiere decir que la presencia de fluido de corte en los ensayos reduce el contacto de la pieza con la atmosfera y de esta forma se reduce también la oxidación acelerada.

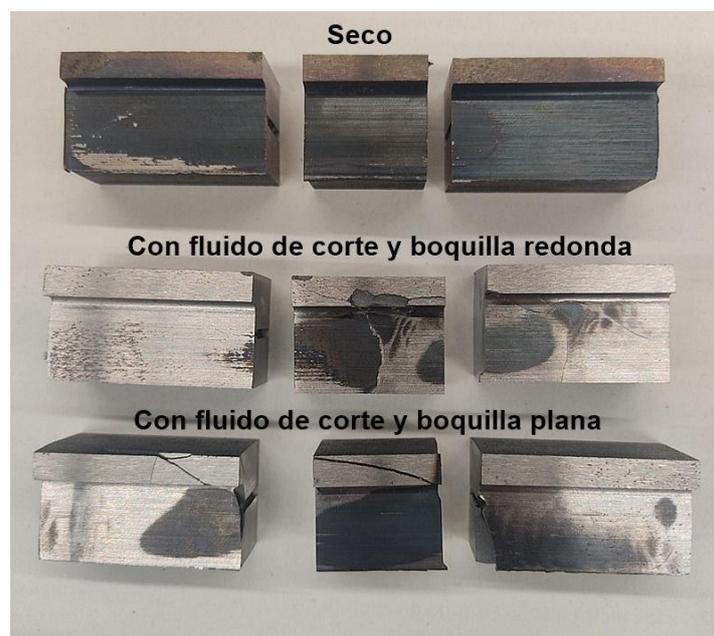


Ilustración 87. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (I)

En la *Ilustración 88* se puede apreciar lo que se ha venido comentando en los resultados tanto de potencias, como de coeficientes de rozamiento y temperaturas, y es que durante el ensayo en seco de los ensayos finales tipo 1 se aumentó tanto la temperatura de la pieza que disminuyó su dureza significativamente. El proceso era muy agresivo y el punto de corte estaba al rojo vivo, por eso se puede ver en esta imagen la rebaba que sobresale en la pieza después del ensayo.

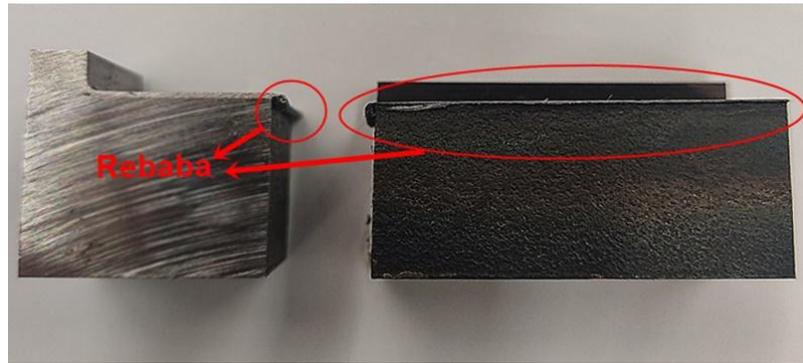


Ilustración 88. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (II)

También es importante comentar que, al contrario que en la pieza del ensayo sin fluido de corte, las piezas (*Ilustración 89*) usadas para los ensayos finales tipo 1 con fluido de corte mostraban importantes grietas. Esto se debe a que cuando el ensayo se realiza en seco la pieza no se enfría repentinamente, es decir, alcanzará mayor temperatura, porque no se evacua calor por el fluido de corte, y mantendrá esa temperatura durante más tiempo. Sin embargo, el calentamiento y el enfriamiento repentino con el fluido de corte crean expansiones y contracciones de la pieza. Esto crea unas tensiones residuales en el material y genera grietas. Muy posiblemente también se hayan producido cambios en la estructura metalúrgica del material debido a estos cambios tan bruscos de temperatura, lo que afecta a las propiedades mecánicas de las piezas.

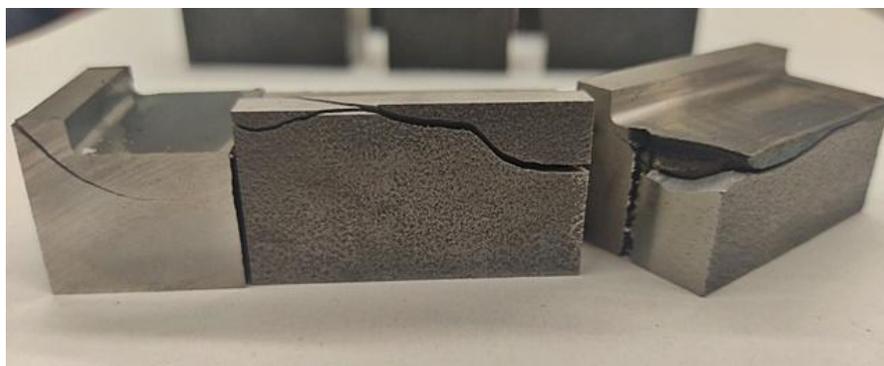


Ilustración 89. Estado de las piezas ensayos finales tipo 1 (III)

Ensayo tipo 2:

En la *Ilustración 90* se ve como la pieza sobre la que se ha realizado el ensayo final tipo 2 en seco esta decolorada debido a las altas temperaturas, y a la falta de fluido corte, el cual, como ya se ha mencionado, evita que la superficie este en contacto con la atmosfera y por tanto que se oxide tanto. La oxidación de esta pieza (en seco) del ensayo final tipo 2 no es tan evidente como en el ensayo fina tipo 1 en seco. Esto se debe a que los parámetros afectan mucho a la calidad superficial de la pieza, y el ensayo tipo 1 era mucho más brusco.

Las dos piezas restantes de la *Ilustración 90*, en las cuales si se ha usado fluido de corte, a simple vista no están decoloradas, por lo que se puede apreciar la influencia del fluido de corte. En este caso no hay diferencias, a simple vista, entre la superficie rectificada usando la boquilla redonda y la boquilla plana. Es posible que utilizando algún método de detección de daño térmico, mencionado en la revisión bibliográfica, se pueda advertir algún tipo de daño debido a las altas temperaturas.

Además, la pieza decolorada, del ensayo sin fluido de corte, también muestra diferentes grietas, lo que seguramente haya sido por las tensiones residuales generadas durante el ensayo. Sin embargo las piezas con fluido de corte no muestran estas grietas.

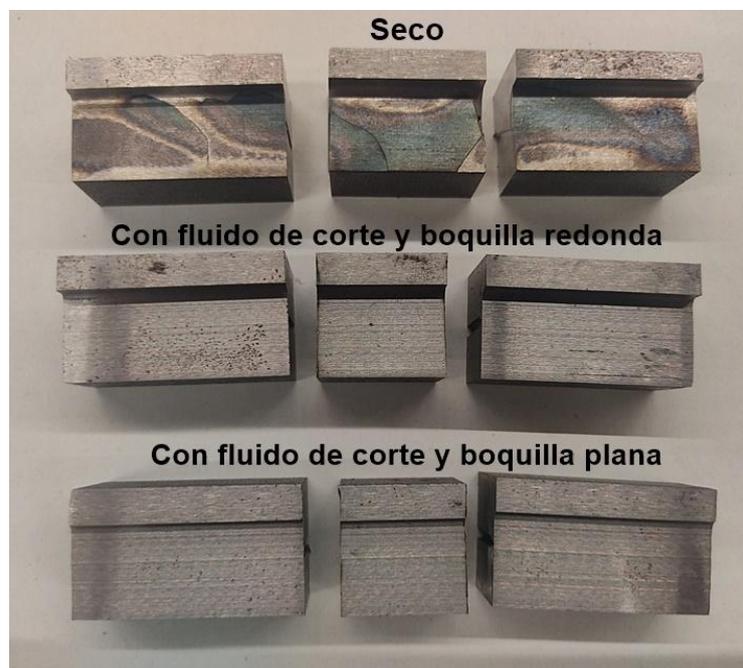


Ilustración 90. Estado de las piezas ensayos finales tipo 2

Ensayo tipo 3:

En la siguiente imagen se muestra el estado de las piezas que se han usado para realizar los ensayos finales tipo 3. A diferencia de los otros ensayos, estas piezas no muestran ninguna decoloración que se pueda apreciar con una inspección visual. Para realizar un análisis más exhaustivo del daño térmico que han sufrido sería necesario realizar una prueba de daño térmico en las piezas.

Las tres piezas de este ensayo tienen una superficie que a simple vista es igual, lo que indica que para ciertos parámetros el rectificado en seco podría ser viable. Además ninguna de las piezas muestra grietas, ni en la superficie ni en los cortes. Lo que indica que las tensiones superficiales que se hayan generado, en el caso de que hubiera habido, no son tan grandes como en los ensayos anteriores.



Ilustración 91. Estado de las piezas ensayos finales tipo 3

14. Aspectos económicos

14.1 Desglose detallado

En este documento se muestran los distintos elementos que componen el presupuesto del trabajo desarrollado. Estos elementos se pueden agrupar en 4 tipos: recursos humanos, recursos materiales fungibles, recursos materiales amortizables y recursos informáticos amortizables.

14.1.1 Recursos humanos

En este apartado se tendrán en cuenta las horas trabajadas durante el proyecto por el ingeniero técnico investigador y por el ingeniero director del proyecto. Las horas de trabajo del ingeniero técnico investigar se pueden dividir en desarrollo de ensayos, trabajo en máquina, análisis de resultados y dirección del proyecto.

Tabla 18. Presupuesto de los recursos humanos

Descripción	Horas [h]	Precio unitario [€/h]	Total [€]
Desarrollo del proyecto	70	13	910
Trabajo en máquina			
Rectificadora	85	13	1.105
Electroerosión hilo	25	13	325
Electroerosión penetración	55	13	715
Análisis de resultados	35	13	455
Redacción del proyecto	150	13	1.950
Dirección del proyecto			
Dirección UPV/EHU I	26	55	1.430
Dirección UPV/EHU II	24	50	1.200
Supervisión IDEKO	10	60	600
Especialista de taller	10	40	400
PRECIO TOTAL			9.090

El presupuesto total de recursos humanos es: NUEVE MIL NOVENTA EUROS.

14.1.2 Recursos materiales fungibles

Este apartado agrupa los materiales que se han utilizado durante el desarrollo del proyecto y que se han desgastado, ya sea total o parcialmente.

Tabla 19. Presupuesto de los recursos materiales fungibles

Concepto	Unidad	Precio unitario [€]	Total [€]
Muela UNESA	1	200	200
Diamante	1	160	160
Probetas	50	100	5.000
Fibra óptica	2	5	10
Electrodo electroerosión por penetración	18	5	90
Hilo electroerosión	1	20	20
Boquillas	2	22	44
Sistema de refrigeración	-	-	200
Material de oficina	-	-	30
PRECIO TOTAL			5.754

El presupuesto total de recursos materiales fungibles es: CINCO MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y CUATRO EUROS.

14.1.3 Recursos materiales amortizables

Este punto presenta el presupuesto de los recursos materiales que se pueden amortizar y han sido usados para el desarrollo del proyecto.

Tabla 20. Presupuesto de los recursos materiales amortizables

Concepto	Horas [h]	Precio unitario [€/h]	Total [€]
Rectificadora plana BLOHM ORBIT 36	85	45	3.825
Máquina EDM ONA CS300	55	30	1.650
Máquina WEDM ONA PRIMA E250	25	35	875
Microscopio LEICA	10	40	400
Ordenador personal	200	0.13	26
Instrumentos de medición	-	-	3.500
PRECIO TOTAL			10.276

El presupuesto total de recursos materiales amortizables es: DIEZ MIL DOSCIENTOS SETENTA Y SEIS EUROS.

14.1.4 Recursos informáticos amortizables

En este apartado se detallan los precios de los programas usados en el proyecto, en función de las horas que se haya utilizado cada uno.

Tabla 21. Presupuesto de los recursos informáticos amortizables

Concepto	Horas [h]	Precio unitario [€/h]	Total [€]
SW Great	45	20	900
DynoWare	25	30	750
TeraTerm	40	35	1.400
MATLAB	40	40	1.600
PRECIO TOTAL			4.650

El presupuesto total de recursos informáticos amortizables es: SIETE MIL CIENTO VEINTISÉIS EUROS.

14.2 Presupuesto total de ejecución del proyecto

Recursos humanos.....	9.090 €
Recursos materiales fungibles	5.754 €
Recursos materiales amortizables.....	10.276 €
Recursos informáticos amortizables	4.650 €
TOTAL	29.770 €
21% IVA	6.251,7 €
PRESUPUESTO TOTAL.....	36.021,7€

El presupuesto total para la ejecución del proyecto es: TREINTA Y SEIS MIL VEINTIÚN EUROS CON SETENTA CÉNTIMOS.

15. Conclusiones

En este apartado se detallan las conclusiones que se han alcanzado teniendo en cuenta los objetivos marcados y el análisis de los resultados.

Este proyecto ha servido para comprobar la validez de los pirómetros de dos colores con fibra óptica para medir temperaturas en rectificado, con presencia de fluido de corte. En rasgos generales, se han conseguido adquirir temperaturas en todos los ensayos, lo que hace llegar a la conclusión de que la metodología funciona y su uso es viable en los procesos de rectificado. Es decir, por lo desarrollado a lo largo del proyecto, se ha conseguido establecer una metodología óptima para la medición de temperaturas en procesos de rectificado plano. También se ha podido probar la influencia del fluido de corte en la disipación de calor por la pieza rectificada y la importancia que tiene una buena adaptación de este al proceso, ya que las temperaturas se ven afectadas por las variaciones de la refrigeración.

En lo que a ensayos respecta, se puede observar que, tal y como se ha presentado en los resultados, el fluido refrigerante lubrica y refrigera la zona corte, lo que hace que el proceso sea más estable, porque la potencia tiene una tendencia lineal y más óptima. El fluido de corte mejora el contacto muela pieza y hace que el coeficiente de rozamiento se mantenga constante, con una tendencia lineal, lo que sugiere que la muela conserva sus propiedades abrasivas, es decir, mantiene su capacidad de corte durante el ensayo con fluido de corte y durante el ensayo en seco el coeficiente de rozamiento disminuye de manera significativa. Esto hace llegar a la conclusión de la refrigeración mejora la limpieza de la muela, evitando que se embote.

En los resultados presentados también se ve que el consumo de potencia es menor con fluido de corte, llegando a reducir la potencia hasta un 26% en el caso más destacable, porque lo que se puede deducir que una correcta adaptación del sistema de refrigeración reduce el consumo energético de los procesos, y por tanto su coste.

Asimismo, se puede concluir que la presencia del fluido de corte presenta una mayor influencia cuando las condiciones de corte son más agresivas, tanto en la lubricación del punto de contacto entre la muela y la pieza, como en la refrigeración. Esto se aprecia en todas las variables medidas de fuerza durante los ensayos y en los coeficientes de rozamiento obtenidos, así como en la apariencia final de las superficies rectificadas. A mayor agresividad del proceso, mayor es el daño térmico sufrido en las piezas. Esto se revela con superficies quemadas, con gran decoloración del material y con importantes grietas en los casos más agresivos, como puede ser a profundidades de pasada de 250micras. Grietas producidas por las tensiones residuales acumuladas durante las pruebas.

La decoloración en las piezas es más acusada en las piezas que se han rectificado en seco. Esto se debe a que el fluido de corte evita que la superficie esté en

contacto directo con la atmosfera, lo que evita su rápida oxidación y a que las temperaturas son más altas en seco, es decir, el rango de temperaturas es más elevado, lo que hace que se produzca un mayor daño térmico en las piezas.

En resumen, durante el presente trabajo se ha demostrado la viabilidad de emplear una sensórica avanzada para la medición de temperaturas en procesos de rectificado plano, adquiriendo mediciones de temperaturas en una zona cercana al punto de corte durante el proceso, y haciendo uso de fluido de corte. Además, se ha demostrado que la temperatura alcanzada durante el rectificado es mayor cuanto más agresivo es el proceso y que el uso de una refrigeración cercana al punto de corte tiene una mayor influencia cuando las condiciones de corte son muy agresivas. Para condiciones menos agresivas, se ha demostrado que la refrigeración tiene una menor influencia, debido a que las variables, como potencias, fuerzas y coeficiente de rozamiento, se mantienen prácticamente constantes independientemente de las condiciones de refrigeración.

16. Líneas futuras

En este apartado se van a describir distintas líneas de trabajo futuras por las que se puede dar continuidad al proyecto y poder avanzar en la medición de temperaturas en rectificado plano con pirómetros dicromáticos y en la caracterización del sistema de refrigeración.

- **Medición de temperaturas**

Las temperaturas que se han mostrado en los resultados de este informe son temperaturas medidas a una distancia de la superficie. Con el fin de poder equiparar y relacionar todos los ensayos, y la temperatura alcanzada en cada pasada, lo más adecuado sería utilizar un modelo térmico para estimar la temperatura en la superficie de rectificado.

En el caso de este proyecto, se ha tratado de simular temperaturas con el software SimRect, un simulador térmico que simula las temperaturas teóricas alcanzadas en la superficie y que tiene en cuenta la distorsión en la distribución de las temperaturas. Sin embargo, no se ha podido realizar la implementación de este programa debido a la falta de tiempo.

Este software tiene en cuenta que el foco de calor, es decir, la muela en este caso, no es estático y se mueve a lo largo de la pieza, calentándola momentáneamente y exponiéndola justo después a temperatura ambiente. Asimismo, también tienen en cuenta el agujero que existe en la pieza, factor importante porque esta forma crea una distorsión en la distribución de las temperaturas. En la siguiente imagen se muestra como la temperatura es diferente, y mayor, sobre la cavidad que en el resto de la pieza.

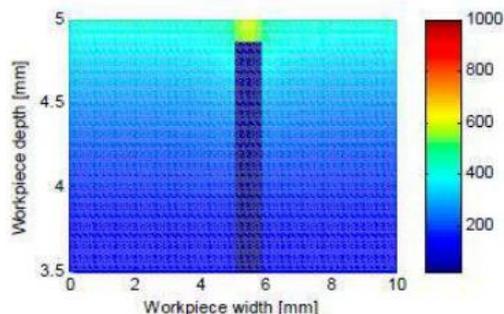


Ilustración 92. Gradiente de temperaturas en la pieza con agujero

Al ejecutar el programa se incluyen los datos del proceso, como son el diámetro de la muela, la anchura, la velocidad de avance... También es necesario incluir unos parámetros de ajuste y la energía específica del propio material (Ilustración 93. Datos de la simulación cinemática).

RECTIFICADO PLANO

Datos de simulación cinemática

\varnothing_s	ae	l _{cg}
<input type="text" value="315"/> mm	<input type="text" value="0.008"/> mm	1.5875
b	V _w	Q _{esp}
<input type="text" value="40"/> mm	<input type="text" value="7.5"/> m/min	1
V _s	<input checked="" type="radio"/> Up-grinding <input type="radio"/> Down-grinding	
<input type="text" value="20"/> m/s		

Parámetro de ajuste [n]	<input checked="" type="radio"/> Ajuste Paramétrico	
<input type="text" value="0.52"/> -		
Parámetro de ajuste [K]	<input type="radio"/> Ajuste Potencia	
<input type="text" value="415"/> -		

E. esp. del material	Energía específica	
<input type="text" value="40"/> J/mm ³	109.0157	<input type="button" value="CALCULAR"/> <input type="button" value="Atrás"/> <input type="button" value="Fin"/> <input type="button" value="Sim. Térmica"/>

Ilustración 93. Datos de la simulación cinemática

Una vez rellenados los parámetros principales que se piden en la primera pantalla, se pasa a la pantalla de simulación térmica. Como este software trabaja con el método de elementos finitos se debe determinar el mallado que se va a usar durante la simulación. Cuando mayor sea el número de nodos más preciso será el cálculo, pero también más complejo y llevará más tiempo. Por ello, es importante encontrar el equilibrio entre la precisión y el tiempo, para poder optimizar el proceso.

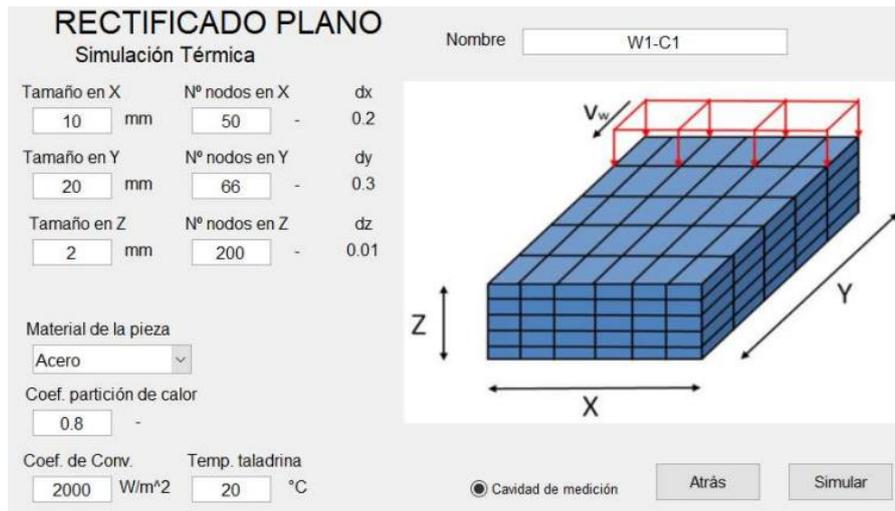


Ilustración 94. Simulación térmica SimRect

Como ya se ha señalado, las cavidades afectan a la transferencia de temperaturas, es decir, la temperatura no se expande igual con agujero que sin él. Por eso es necesario determinar en el programa las dimensiones del agujero, y la distancia hasta la superficie a rectificar. También se pueden simular temperaturas en piezas que no tengan ninguna cavidad.

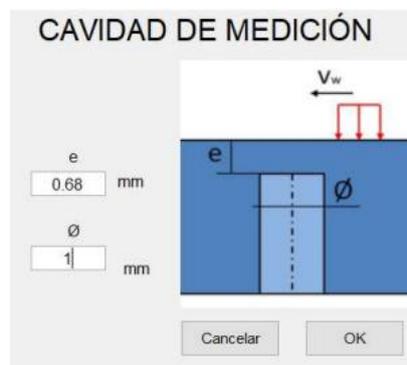


Ilustración 95. Datos de las cavidades en la simulación térmica

Una vez completados todos los parámetros y variables necesarias para definir el proceso, se realiza la simulación térmica y se obtienen los resultados. El programa permite conocer los datos de temperaturas en el agujero, en la superficie de este, y a la misma distancia que se encuentra el agujero pero sin agujero, y en la superficie, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

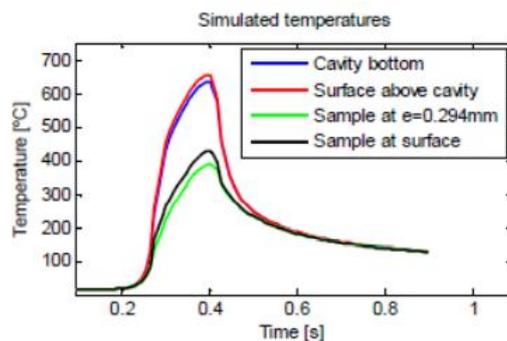


Ilustración 96. Simulación de temperaturas

Al mismo tiempo, el programa genera una carpeta con los datos calculados. El volumen de datos que se genera dependerá mucho del mallado, pero es un volumen grande y el análisis de esto es difícil. Por esto, otra futura revisión del proyecto podría ser desarrollar otro modelo térmico, que no fuese en 3 dimensiones, para simplificarlo más y poder conocer las temperaturas en la superficie de la pieza.

- **Sistema de refrigeración**

En este estudio se ha hecho uso de distintas boquillas para ver la influencia de estas en las medidas temperaturas. Un aspecto interesante para desarrollar en un trabajo próximo sería emplear más variedades de boquillas, con diferentes materiales y secciones, y así poder tener una batería de ensayos más amplia.

Para este proyecto se han fabricado diferentes boquillas (*Ilustración 97. Boquillas*), que por faltar de tiempo no se han podido implementar en los ensayos, por lo que más adelante sería de gran interés realizar ensayos con estas boquillas.

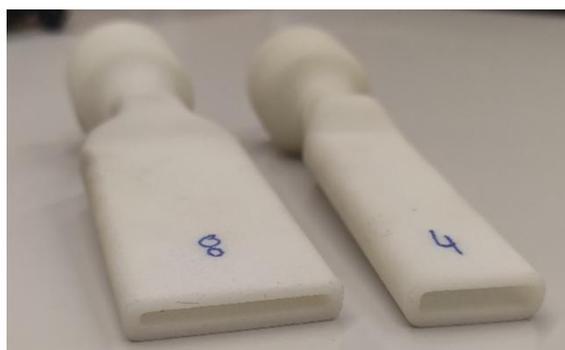


Ilustración 97. Boquillas

Estas boquillas, al igual que las que se han utilizado en las pruebas, son boquillas de chorro libre, no obstante, en un proyecto futuro se podría hacer uso de boquillas de zapata, ya mencionadas en el análisis del estado del arte de este estudio. Sería interesante ver la influencia de este cambio de tipo de boquilla tanto en las temperaturas como en la limpieza de la muela.

Para poder aportar un chorro con mayor velocidad y caudal a la zona de corte, una solución sería hacer un cambio en la bomba del circuito de refrigeración. De esta forma se podría conseguir más presión y trabajar en otras condiciones de refrigeración.

Por último, y como alternativa más innovadora en lo que respecta a la refrigeración, un cambio de sistema de refrigeración aportaría grandes beneficios y resultados interesantes. Un ejemplo es la refrigeración criogénica, ya que existen equipos portables que se pueden acoplar a las máquinas, y sería interesante comparar este tipo de refrigeración con la convencional, usada en este estudio.

17. Bibliografía

- [1] Marinescu, I. D., Rowe, W. B., Dimitrov, B., & Ohmori, H. (2012). *Tribology of abrasive machining processes* (2nd ed.). Norwich, CT: William Andrew Publishing.
- [2] Rowe, W. B., Morgan, M. N., Batako, A., & Jin, T. (2003). Energy and temperature analysis in grinding. In *WIT Transactions on Engineering Sciences* (Vol. 44). Southampton, England: WIT Press.
- [3] Malkin, S., & Guo, C. (2007). Thermal analysis of grinding. *CIRP Annals ... Manufacturing Technology*, 56(2), 760–782.
- [4] Osorio Alzate, D. M. (2017). Estudio de la corrosión sufrida a altas temperaturas por sales fundidas en aceros para caldera tipo ASTM A193 y ASTM A53. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [5] Fergani, O., Shao, Y., Lazoglu, I., & Liang, S. Y. (2014). Temperature effects on grinding residual stress. *Procedia CIRP*, 14, 2–6.
- [6] Meyer, D., & Wagner, A. (2016). Influence of metalworking fluid additives on the thermal conditions in grinding. *CIRP Annals ... Manufacturing Technology*, 65(1), 313–316.
- [7] Karpuschewski, B., Bleicher, O., & Beutner, M. (2011). Surface integrity inspection on gears using Barkhausen noise analysis. *Procedia Engineering*, 19, 162–171.
- [8] Urgoiti, L. (2020). Análisis numérico y experimental del rectificado de caras orientado al comportamiento térmico del proceso.
- [9] Lanzagorta, J. L., Urgoiti, L., Vazquez, P. R., Barrenetxea, D., & Sánchez, J. A. (2020). Experimental approach for a grinding burn in-process inspection system based on Eddy Current. *Procedia CIRP*, 87, 391–396.
- [10] González-Santander, J. L. (2016). Analytic solution for maximum temperature during cut in and cut out in surface dry grinding. *Applied Mathematical Modelling*, 40(3), 2356–2367.
- [11] Skuratov, D. L., Ratis, Y. L., Selezneva, I. A., Pérez, J., Fernández de Córdoba, P., & Urchueguía, J. F. (2007). Mathematical modelling and analytical solution for workpiece temperature in grinding. *Applied Mathematical Modelling*, 31(6), 1039–1047.
- [12] Tahvilian, A. M., Champlaud, H., Liu, Z., & Hazel, B. (2013). Study of workpiece temperature distribution in the contact zone during robotic grinding process using finite element analysis. *Procedia CIRP*, 12, 205–210.
- [13] Ortega, N., Bravo, H., Pombo, I., Sánchez, J. A., & Vidal, G. (2015). Thermal analysis of creep feed grinding. *Procedia Engineering*, 132, 1061–1068.

[14] Zhao, Z., Qian, N., Ding, W., Wang, Y. and Fu, Y. (2020). Profile grinding of DZ125 nickel-based superalloy: Grinding heat, temperature field, and surface quality. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, pp.10-22.

[15] NADOLNY, K. and PLICHTA, J., 2006. Comparative method of thermovision temperature measurement in single-pass internal cylindrical grinding. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 6(4), pp.67-74.

[16] J.R. Branstetter, Some practical aspects of surface temperature measurement by optical and ratio pyrometers, NASA Technical Note. (1966) 73.

[17] Ueda, T., Tanaka, H., Torii, A., & Matsuo, T. (1993). Measurement of grinding temperature of active grains using infrared radiation pyrometer with optical
Director/Directora (1): Godino Fernández, Leire

Director/Directora (2): Izquierdo Aramburu, Borja

Tan, X., Li, T., Xu, L., ... Shi, T. (2020). In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 156(107595), 107595.

[19] Urgoiti, L., Barrenetxea, D., Sánchez, J. A., & Pombo, I. (2019). Development of a rotary two-colour pyrometer for thermal measurements in face grinding operations. *Procedia Manufacturing*, 41, 1017-1022.

[20] Otegui, A. (2020). Estudio del método de medición de temperaturas en el rectificado para la limitación del daño térmico en las piezas.

[21] Gorrochategui Jairo, I. (2019). Desarrollo de sensórica avanzada para la medición de las temperaturas generadas durante el proceso de rectificado.

[22] Kirsch, B. (2013). Wirkmechanismen der Kuhlsmierstoff-Zufuhr beim Schleifen.

[23] Klocke, F., Baus, A., & Beck, T. (2000a). Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles. *CIRP Annals ... Manufacturing Technology*, 49(1), 241-244.

[24] M.N Morgan (2008). Optimisation of fluid application in grinding. *CIRP Annals... Manufacturing Technology*, 57(1), 363-366.

[25] J.A Webster (1995). Grinding Fluid Application System Design. *CIRP Annals... Manufacturing Technology*, 44(1), 333-338.

[26] C. Heinzl (2020). Interactions of grinding tool and supplied fluid. *CIRP Annals... Manufacturing Technology*, 69(2), 624-645.

[27] Uhlmann E, Kirchgatter M (2009) Technologischer Nutzen von Schleifbelagsnutungen - Vorteile teuer erkaufte. *Werkstattstechnik*, 99(6), 390-395.

[28] Rezaei S, Suto T, Waisa T, Noguchi H (1992) Creep feed grinding of advanced ceramics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B 206, 93-99.

[29] A. Rodríguez (2021). Drilling of CFRP-Ti6Al4V stacks using CO2-cryogenic cooling. Journal of Manufacturing Processes, 64, 58-66.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA REFRIGERACIÓN EN PROCESOS DE RECTIFICADO DE ÚLTIMA GENERACIÓN

DOCUMENTO 4- ANEXOS

Alumno/Alumna: Zaldegui López, Irene

Director/Directora (1): Izquierdo Aramburu, Borja

Director/Directora (2): Godino Fernández, Leire

Curso: 2020 / 2021

Fecha: Bilbao, 30 de junio de 2021

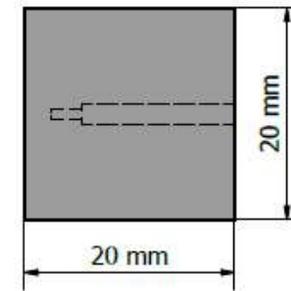
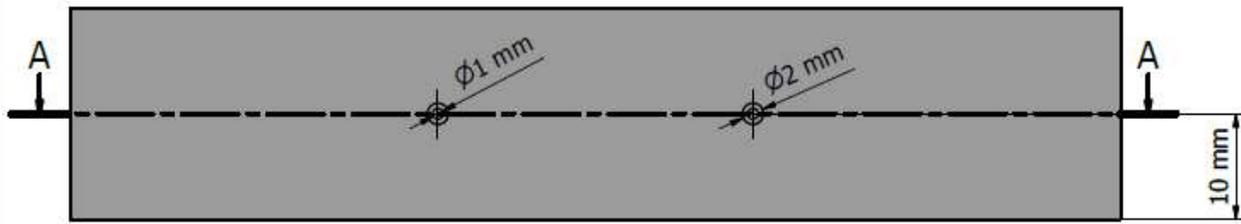
ANEXOS

- ANEXO I: PROGRAMACIÓN MATLAB
- ANEXO II: PLANO PIEZAS

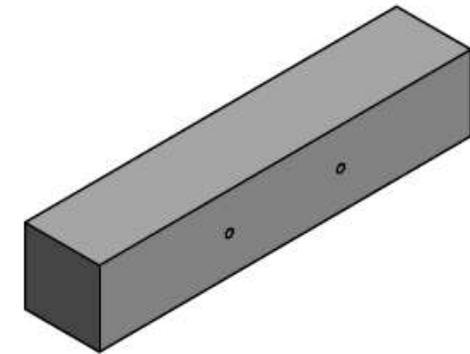
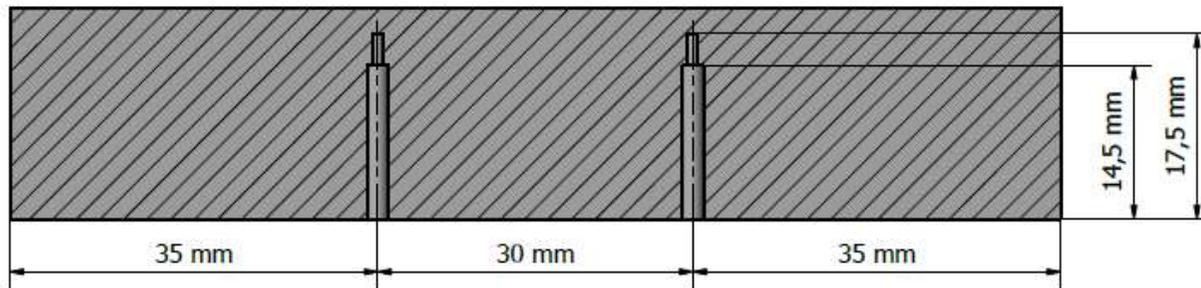
ANEXO I: PROGRAMACIÓN MATLAB

```
1. filename='NOMBRE DEL ARCHIVO.txt';
2. delimiterIn=' ';
3. A=importdata(filename,delimiterIn);
4. C1=A(:,1);
5. CANAL1=movmean(C1,301);
6. C2=A(:,2);
7. CANAL2=movmean(C2,301);
8. C3=A(:,3);
9. CANAL3=movmean(C3,301);
10. C4=A(:,4);
11. CANAL4=movmean(C4,301);
12. C1C2=CANAL1./CANAL2;
13. C3C4=CANAL3./CANAL4;
14. filename='CALIBRACION_MODULO2_C3_C4.txt';
15. delimiterIn=' ';
16. M2=importdata(filename,delimiterIn);
17. M2Div=M2(:,1);
18. M2Temp=M2(:,2);
19. filename='CALIBRACION_MODULO1_C1_C2.txt';
20. delimiterIn=' ';
21. M1=importdata(filename,delimiterIn);
22. M1Div=M1(:,1);
23. M1Temp=M1(:,2);
24. ResultM2=interp1(M2Div,M2Temp,C3C4);
25. ResultM1=interp1(M1Div,M1Temp,C1C2);

26. t=0;tiempo=0;
27. for i=1:length(ResultM1)
28. tiempo(i,1)=t;
29. t=t+0.0001;
30. end
31. plot(tiempo,ResultM1)
32. hold on;
33. plot(tiempo,ResultM2)
34. xlabel('t(s)');ylabel('T(°C)');
35. axis([0 105 300 900]); → Escala del gráfico (Varía)
36. title('NOMBRE DEL GRÁFICO')
```



CORTE A-A



50	Probeta			DIN 1.2510		
Cont./Kant.	Denominación/Izendapena		Norma/Arotadía Plano/Planoa	Marca/Markia	Materiál/Materiála Obserb./Behaketaik	Unid./Osoa Peso/Pisua
	Fecha/Data:	Nombre/Izena:	Firma/Signatu:	UNIVERSIDAD DE PAIS VASCO EUSKAL HERRIKO UNIBETSITATEA		
	06/11/2019	Otegui Álvarez, Andrea		ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO BILBOKO INGENIARIETZA ESKOLA		
	Dibujado/Marraztutako:			GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA INGENIARITZA MECANIKORIKO GRADUA		
	Comprob./Egiaztatu:			 		
	Dirigido/Zuzendutako:					
		Escala/Eskala:	PROBETA		ENSAYOS DE PIROMETRÍA	
Toleran. gen.: Perdoiak gen.: UNE EN 22768 meda		2:1 (1:1)			Plano Nº/Zkia.: 1	
					Plano Cont./Kop.: 1	
					Calificación/Kalifikazioa:	