



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, DE MATERIALES Y
FABRICACIÓN
ÁREA DE CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA DE LOS
PROCESOS DE FABRICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

INSTALACIÓN, PUESTA A PUNTO Y VALIDACIÓN DE UN
DINAMÓMETRO PIEZOELÉCTRICO PARA UN CENTRO DE
TORNEADO

Grado en

INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: ALEJANDRO REYES OTERO

Tutor: FRANCISCO JAVIER TRUJILLO VILCHES

Cotutor: MANUEL JOSE HERRERA FERNANDEZ

MÁLAGA, Septiembre de 2023



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Breve Resumen

Las aleaciones ligeras, principalmente las de aluminio y titanio, son utilizadas habitualmente en la fabricación de componentes estructurales en la industria aeronáutica, siendo el mecanizado uno de los procesos de fabricación más utilizados para la obtención de estos componentes. Debido a razones medioambientales, la tendencia actual es mecanizar estas aleaciones en seco, eliminando de forma total la utilización de fluidos de corte. En estas condiciones, el mecanizado se ejecuta en condiciones muy agresivas, por lo que es necesario estudiar la influencia de las distintas variables de entrada al proceso y su influencia sobre las variables de salida, al objeto de optimizar estos procesos bajo estas condiciones. En este sentido, la monitorización de la fuerza de corte en función de los valores de los parámetros de corte se convierte en una variable de elevado interés, dado que a través de su observación se pueden monitorizar el desgaste de la herramienta (flanco, cráter, rotura, desgaste del filo, rotura catastrófica) el mecanismo de la formación de la viruta, la observación de la maquinabilidad, la deformación elástica del material, entre otros.

Dentro de este marco se encuentra trabajando el Grupo de Investigación TEP-933 “Ingeniería de Fabricación” de la Universidad de Málaga, dentro de una de sus principales líneas de investigación “Optimización de procesos de mecanizado de aleaciones ligeras”. En concreto, este Trabajo Fin de Grado se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación “Sistema experto para la mejora de la integridad superficial en el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras (SPAREMETAL)”, con referencia PID2021-125988OBI00, convocatoria de 2021 de «PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO» en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023, del Ministerio de Ciencia e Innovación.

De este modo, en este Trabajo Fin de Grado se aborda la instalación, puesta a punto y validación de un dinamómetro piezoeléctrico para un centro de torneado. Para ello, se ha realizado un estudio del concepto fuerza de corte y de sus parámetros de influencia, así como de los distintos sistemas y dispositivos de medición de fuerzas de corte en mecanizado. Se ha elaborado una metodología para la puesta a punto y utilización del dinamómetro, mediante la realización de diversos ensayos con diversas aleaciones ligeras, contrastando estos resultados con los existentes en la literatura al respecto, realizando una validación del procedimiento de medición y mediante comparación con la literatura se ha comprobado la validez del dinamómetro. Finalmente, se ha elaborado una guía rápida de instalación, puesta a punto y uso del equipamiento de captación de fuerzas de corte, que podrá ser utilizada por futuros investigadores del grupo. Además de esto se realizará una guía sobre la instalación y puesta a punto del dinamómetro.

Palabras clave: Mecanizado, torneado, fuerza de corte, dinamómetro, aleaciones ligeras.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Abstract

Light alloys, mainly aluminum and titanium, are widely used in the manufacture of structural components in the aeronautical industry, machining being one of the most common used manufacturing processes to obtain these components. Due to environmental reasons, the current trend is to machine these alloys dry, eliminating the use of cutting fluids. Under these conditions, machining is carried out under very aggressive conditions, so it is necessary to study the influence on the output variables, in order to optimize these processes under these conditions. In this sense, the monitoring of the cutting force based on the values of the cutting parameters becomes a variable of high interest, since through its observation the tool wear can be monitored (flank, crater, breakage, edge wear, catastrophic breakage), the mechanism of chip formation, the observation of machinability, the elastic deformation of the material, among other.

The Research Group-933 “Manufacturing Engineering” of the University of Malaga is working within this framework, within one of its main lines of research “Optimization of light alloy machining processes”. Specifically, this Final Degree Project is framed within the research project “Expert system for improving surface integrity in sustainable machining of light alloys (SPAREMETAL)”, with reference PID2021-125988OBI00, 2021 call for <<KNOWLEDGE GENERATION PROJECTS>> within the framework of the State Program to Promote Scientific-Technical Research and its Transfer, of the State Plan for Scientific, Technical and Innovation Research 2021-2023, of the Ministry of Science and Innovation.

This work is focused on the installation, setup and validation of a piezoelectric dynamometer for a turning center. For this purpose, a study has been carried out on the concept of cutting force and its influencing parameters, as well as on the different systems and devices for measuring cutting forces during machining. A methodology for the development and use of the dynamometer was developed by performing various tests with different light alloys and comparing the results with those in the literature on the subject, validating the measurement procedure. By comparing the results with the literature, the validity of the dynamometer was verified. Finally, a quick guide for the installation, setup and use of the cutting force capture equipment has been prepared, which may be used by future researchers of the group. In addition to this, a guide has been developed on the installation and setup of the dynamometer.

Key words: Machining, turning, cutting force, dynamometer, light alloys.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Agradecimientos

A mi familia, a mis padres por su continuo apoyo durante estos complicados años, que siempre han estado ahí para animarme y ayudarme a seguir.

A mi abuelo, Antonio, que, aunque no has podido verme graduado, eras al que más ilusión le hacía verme como ingeniero, espero que estés orgulloso de verme acabar allí donde estés.

A mis tutores, Manuel, por su paciencia y tiempo empleado en el taller y a Javier, por su ayuda y confianza desde el principio.

Y por último a los amigos que me llevo de esta etapa, que han sido mi gran apoyo durante estos años, y en especial a ti, Salva, por animarme cuando estaba más hundido y por celebrar cada alegría juntos, me llevo un gran amigo para siempre.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Índice general

CAPÍTULO 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura de la memoria.....	2
CAPÍTULO 2. Medida de las fuerzas de corte en mecanizado.....	3
2.1. Fuerzas de corte en el mecanizado	3
2.2. Fuerzas de corte en el proceso de torneado.....	5
2.3. Técnicas de medición de fuerzas en el proceso del mecanizado.....	9
2.4. Dinamómetro piezoeléctrico	11
2.5. Otros estudios.....	12
2.6. Conclusión.....	16
CAPÍTULO 3. Metodología experimental.....	17
3.1. Características técnicas del equipo.....	18
3.1.1. Cable de alta tensión	19
3.1.2. Cable de red.....	20
3.1.3. Amplificador.	21
3.1.4. Dinamómetro.....	22
3.2. Puesta a punto del equipo.....	25
3.3. Monitorización del proceso.....	28
3.4. Interpretación de datos con el software.....	39
3.5. Guía rápida de uso.....	47
CAPÍTULO 4. Análisis de resultados	49
4.1. Primeras comprobaciones	49
4.2. Análisis fuerzas de corte	53
4.2.1. Análisis fuerzas de corte en mecanizado de Aluminio UNS A97075.....	53
4.2.2. Análisis fuerzas de corte en AISI 14404	56
4.2.3. Análisis Fuerzas de corte en AISI 1045	59
4.3. Conclusiones	63
CAPÍTULO 5. Conclusiones.....	65
CAPÍTULO 6. Referencias Bibliográficas.....	67



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



Índice de figuras

Figura 1. Zonas de deformación. Adaptado de.	3
Figura 2. Corte ortogonal. Adaptado de.	4
Figura 3. Ángulo de desprendimiento.	5
Figura 4. Torneado.	6
Figura 5. Parámetros de corte en torneado.	7
Figura 6. Reacciones a la fuerza de corte descompuesta en sus tres componentes.	8
Figura 7. Dinamómetro mecánico (a) y digital (b)	9
Figura 8. Galga extensiométrica impresa uniaxial, indicando sus diferentes partes.	10
Figura 9. Puente de Wheatstone.	10
Figura 10. Sensores piezoeléctricos.	12
Figura 11. Variación de la fuerza de corte con respecto a la velocidad de corte. Adaptado de [63].	15
Figura 12. Dinamómetro Kistler modelo 9129AA.	17
Figura 13. Disposición de sensores de fuerza en el dinamómetro multicomponente.	17
Figura 14. Esquema general de la metodología experimental.	18
Figura 15. Equipo utilizado.	19
Figura 16. Cable de alta tensión.	20
Figura 17. Cable de red.	21
Figura 18. Amplificador Kistler.	21
Figura 19. Dimensiones amplificador.	22
Figura 20. Dinamómetro con portaherramientas y adaptador.	23
Figura 21. Dimensiones dinamómetro multicomponente tipo 9129AA.	23
Figura 22. Dimensiones adaptador tipo 9129AB.	24
Figura 23. Dimensiones portaherramientas 9129AE.	24
Figura 24. Conexión dinamómetro.	25
Figura 25. Tapón de seguridad amplificador.	26
Figura 26. Conexión amplificador.	26
Figura 27. Conexión cable de alimentación y de red.	27
Figura 28. Conexión ordenador.	27
Figura 29. Dinamómetro fijado en el torno.	28
Figura 30. Interruptor amplificador.	28
Figura 31. Luces amplificador.	29
Figura 32. Pantalla principal.	29
Figura 33. Desplegable Hardware.	30
Figura 34. A/D Board.	30
Figura 35. Pestaña Add/Edit LabAmp Device.	31
Figura 36. Setup Wizard.	31
Figura 37. Pestaña Multichannel Labamp.	32
Figura 38. Recorte certificado de calibración.	32
Figura 39. Orden canales.	32
Figura 40. Pestaña Force & Moment Calculation.	33
Figura 41. Recorte Ficha Técnica.	33
Figura 42. Desplegable "Edit".	34
Figura 43. Pestaña "Parameters".	34
Figura 44. Pestaña "Physical Channels".	35
Figura 45. Pestaña "Calculated Channels".	35
Figura 46. Pestaña "Data Manipulation".	36
Figura 47. Botón "Documentation".	36

Figura 48. Pestaña Comments.....	37
Figura 49. Pestaña File, Data, Time.....	37
Figura 50. Botón "Setup views".....	38
Figura 51. Ventana "View Setup".....	38
Figura 52. Botón Start".....	38
Figura 53. Botón "GO" y "STOP".....	39
Figura 54. Botón "Open".....	39
Figura 55. Botones estadísticas.....	39
Figura 56. Botón "New view".....	40
Figura 57. Ventana "New view".....	40
Figura 58. Botón "Edit View".....	40
Figura 59. Ventana "Edit view".....	41
Figura 60. Botón "Cursor Tool".....	41
Figura 61. Ventana "Cursor Tool".....	42
Figura 62. Botón "FFT".....	42
Figura 63. Ventana "FFT".....	42
Figura 64. Zoom.....	43
Figura 65. Ventana "FFT Scaling".....	43
Figura 66. Función FFT Eje logarítmico.....	44
Figura 67. Ventana "Stadistics".....	44
Figura 68. Botones "Horizontal grid" y "Vertical grid".....	45
Figura 69. Ventana "Horizontal grid" y "Vertical grid".....	45
Figura 70. Botones "Lock Scaling" y "Unlock Scaling".....	45
Figura 71. Botón " Manual Scaling ".....	46
Figura 72. Botón "Filtering".....	46
Figura 73. Ventana "Filtering".....	46
Figura 74. Diagrama de flujo guía rápida de puesta a punto.....	48
Figura 75. Herramienta de corte.....	49
Figura 76. Dimensiones herramienta de corte.....	49
Figura 77. Portaherramientas.....	50
Figura 78. Ensayo Titanio.....	51
Figura 79. Fuerza de corte en función de la velocidad para $f=0.1$ mm/rev. Adaptado de.....	51
Figura 80. Ensayo AISI 1050.....	52
Figura 81. Fuerzas de corte en función del recubrimiento de la herramienta de corte. 1-Sin recubrimiento; 2-TiC + TiCN + TiN; 3-TiC+ Al ₂ O ₃ + TiN; 4-TiAlN. Adaptado de.....	52
Figura 82. Ensayo aluminio diámetro=20 mm.....	54
Figura 83. Ensayo aluminio diámetro=18 mm.....	54
Figura 84. Ensayo aluminio diámetro=16 mm.....	55
Figura 85. Comparativa ensayos aluminio.....	55
Figura 86. Fuerza de corte en función de diferentes parámetros de corte.....	56
Figura 87. Resultados ensayos Aluminio.....	56
Figura 88. Ensayo AISI 14404 diámetro=18 mm.....	57
Figura 89. Ensayo AISI 14404 diámetro=16 mm.....	57
Figura 90. Ensayo AISI 14404 diámetro=14 mm.....	58
Figura 91. Ensayo AISI 14404 diámetro=12 mm.....	58
Figura 92. Comparativa ensayos AISI 14404.....	59
Figura 93. Resultados ensayos AISI 14404.....	59
Figura 94. Ensayo AISI 1045 diámetro=40 mm.....	60
Figura 95. Ensayo AISI 1045 diámetro=38 mm.....	60
Figura 96. Ensayo AISI 1045 diámetro=36 mm.....	61
Figura 97. Comparativa ensayos AISI 1045.....	61



Figura 98. Fuerzas de corte ensayo AISI 1045 diámetro=36 mm.....	62
Figura 99. Rotura herramienta de corte.....	62
Figura 100. Probeta AISI 1045.	62
Figura 101. Resultados AISI 1045.	63



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA





Índice de Tablas

Tabla 1. Características técnicas cable tipo 1687B5.	20
Tabla 2. Características técnicas amplificador tipo 5167A81.	22
Tabla 3. Características técnicas Dinamómetro piezoeléctrico tipo 9129AA.	25
Tabla 4. Resumen materiales validación.	49
Tabla 5. Composición química Ti6Al4V.	50
Tabla 6. composición química AISI 1045.	52
Tabla 7. Resumen ensayos.	53
Tabla 8. Composición química Aluminio UNS A97075.	53
Tabla 9. Composición química AISI 14404.	56



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



CAPÍTULO 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La industria aeronáutica es un sector altamente especializado y tecnológicamente muy avanzado que lo convierte en una industria muy importante tanto a nivel nacional como internacional. La investigación y el desarrollo son fundamentales en esta industria, ya que se necesita optimizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de las aeronaves. Por ello se invierte mucho en innovación tecnológica, centrados en profundizar sobre el conocimiento de los materiales usados en estas industrias.

Dentro de estos materiales están las aleaciones ligeras, muy usadas en la actualidad en esta industria debido a sus propiedades únicas. Las aleaciones ligeras más usadas son aluminio, titanio y magnesio. En concreto la aleación de aluminio tiene grandes ventajas como su alta resistencia mecánica y su baja densidad, lo que la hace muy ligera en comparación con otros materiales como el acero. Esto tiene especial interés en una industria como la aeronáutica, ya que menos peso se refleja en una menor demanda de combustible, lo que se traduce en una menor emisión de gases contaminantes además de un ahorro económico. Además, gracias a su alta resistencia mecánica es capaz de soportar grandes cargas y fuerzas, a pesar de su poca densidad.

Dentro de este marco de investigación se encuentran investigando de forma conjunta el grupo de investigación TEP933 de la Universidad de Málaga [1]. Entre sus diversas líneas de investigación, se encuentra el proyecto “Sistema experto para la mejora de la integridad superficial en el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras (SPAREMETAL)”, con referencia PID2021-125988OB-I00, convocatoria de 2021 de «PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO» en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023, del Ministerio de Ciencia e Innovación, con un presupuesto de 101.156 €. En esta línea de trabajo se encuentra este proyecto, en el que mediante el uso de un dispositivo de medición de fuerzas se va a analizar las fuerzas de corte en un mecanizado de aleaciones ligeras.

La fuerza de corte ejercida por la herramienta en un mecanizado con arranque de viruta puede medirse mediante el uso de dinamómetros. Los datos recogidos por este instrumento se pueden usar para la monitorización del proceso de corte. Con esto podemos prever rotura, desgaste de la herramienta etc.

La Universidad de Málaga ha adquirido recientemente un dinamómetro piezoeléctrico 9129AA de la marca Kistler, que se empleará para la medición de fuerzas que se producen durante el mecanizado, con lo que se pretende ampliar el estudio de la influencia de los parámetros de corte en piezas mecanizadas.

A través de este Trabajo Fin de Grado se realizará una revisión del estado del arte sobre la influencia de los parámetros de corte en el mecanizado. También se realizará un análisis de las especificaciones técnicas del dinamómetro piezoeléctrico 9129AA, identificando sus parámetros principales. Se desarrollará un manual de instalación tanto del equipo como del software asociado al mismo, que incluirá las principales aplicaciones, una selección rápida y optimizada de los parámetros, así como los protocolos de seguridad necesarios. Por último, también se comprobará el correcto funcionamiento del equipo comparando los resultados obtenidos en la práctica con los datos de la bibliografía usada.

1.2. Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es el la instalación y puesta a punto de un dinamómetro piezoeléctrico enfocado en un proceso de torneado. Para alcanzar este objetivo principal se plantean otra serie de objetivos parciales:

- Revisar el estado del arte del uso de dinamómetros en procesos de mecanizado, para comprender el funcionamiento de estos dispositivos.
- Analizar el dinamómetro piezoeléctrico 9129AA, características técnicas, entorno y aplicaciones, así como el software de medición asociado.
- Verificar el equipo, realizando un ensayo en el taller y comparando los resultados obtenidos con los de la literatura.
- Elaborar una metodología para su puesta a punto y utilización.

Aplicando los conocimientos adquiridos durante este trabajo se ha elaborado un manual de uso, en el que se indicarán los pasos a seguir para la correcta instalación del equipo, además de configurar el software correctamente. También se ha incluido en el manual las principales funciones que tiene el programa para analizar los datos.

1.3. Estructura de la memoria

La memoria del presente trabajo se ha estructurado en 6 capítulos.

En el capítulo 1 se ha hecho una revisión del estado del arte para así poder hacer una introducción preliminar.

En el capítulo 2 se ha realizado una revisión de la literatura referente a las fuerzas de corte, para así centrarse después en las fuerzas de corte en el torneado y acabar revisando los dispositivos de medición de fuerzas, y en concreto, el dinamómetro piezoeléctrico.

El capítulo 3 se centra en la metodología experimental. En este capítulo se explican las características técnicas del equipo utilizado, así como de su software asociado. Tras ello se indica como se ha realizado la monitorización del proceso de corte, y finaliza este capítulo realizando una breve guía de uso.

Tras ello en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de una serie de ensayos con diversos materiales y parámetros de corte para así poder obtener 2 objetivos diferentes. El primer objetivo es comprobar el correcto funcionamiento del equipo, y para ello los resultados deben ser coherentes con los de la literatura. El segundo objetivo es la obtención de los parámetros de corte que más influyen en las fuerzas de corte.

En el capítulo 5 se recogen las principales conclusiones del trabajo realizado.

Por último, en el capítulo 6 se recogen una serie de referencias bibliográficas consultadas durante la realización de este trabajo.

CAPÍTULO 2. Medida de las fuerzas de corte en mecanizado.

2.1. Fuerzas de corte en el mecanizado

El mecanizado es un proceso de fabricación apto para modificar formas, dimensiones y grado de acabado superficial de las piezas, que consiste en el arranque de material en forma de virutas o partículas. Esta técnica está ampliamente difundida y practicada en las industrias, siendo considerada como una de la más importantes entre los procesos de fabricación. Los procesos de mecanizado se desarrollan mediante el uso de máquinas herramientas como el torno o la fresadora.

El proceso de corte tiene lugar mediante la aplicación de fuerzas de compresión de la herramienta sobre la pieza, dando lugar a una cizalla del material cuando se alcanza su límite de resistencia a esfuerzos cortantes [2]. Durante el corte se diferencian 3 zonas (Figura 1):

- Zona primaria: Es la zona en la cual, durante el proceso de corte, el metal se comprime y se deforma plásticamente hasta la fractura, generando la viruta.
- Zona secundaria: La viruta que se genera durante el proceso de corte y que sigue en contacto con la herramienta.
- Zona terciaria: Zona donde incide la herramienta de corte, que almacena ciertas tensiones y las libera cuando deja de incidir la herramienta.

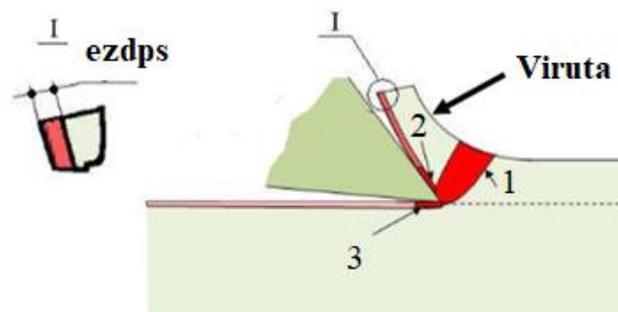


Figura 1. Zonas de deformación. Adaptado de [2].

La deformación plástica producida tanto en la zona primaria como en la secundaria son las principales consumidoras de trabajo empleado en el proceso de corte de metales siendo el espesor de la zona de deformación plástica, o *ezdps*, una medida de la magnitud del mismo. En [2] se hace un estudio sobre la influencia de los parámetros de corte en el espesor de la zona de deformación plástica secundaria.

La fuerza de corte es la fuerza requerida por la herramienta para el mecanizado de la pieza, en otras palabras, la resistencia que ejerce el material cuando es comprimido por la herramienta de corte, hasta originar su desprendimiento [3]. El estudio de estas fuerzas resulta esencial para conocer el comportamiento de los materiales, determinar la herramienta a utilizar y evaluar la potencia necesaria en la máquina [4]. Estos factores son de gran importancia en la industria aeronáutica y otros campos de la ingeniería, ya que se trabaja con materiales costosos y se debe optimizar al máximo los parámetros del mecanizado.

En la fuerza de corte tienen influencia diversos factores como:

- Material a mecanizar.
- Parámetros de corte, siendo:
 - Velocidad de corte (v_c).

- Avance (f).
- Profundidad de corte (a_p).
- Geometría de la herramienta, siendo:
 - Ángulo de desprendimiento (γ).
 - Ángulo de posición del filo principal (k_r).
 - Radio de punta de la herramienta (r_ϵ).
- Desgaste de la herramienta de corte que depende de la geometría de la herramienta y del tipo de mecanizado.
- Sección de la viruta ($h \times b$), la cual depende directamente de los parámetros de corte (a_p, a, v_c) y de los parámetros geométricos (k_r).

Además de estos factores también tienen influencia las condiciones de lubricación/refrigeración, aunque en menor medida.

Estos parámetros son de gran importancia para que el corte en una operación de mecanizado sea efectivo [5]. Los parámetros más importantes son: velocidad de corte (v_c), avance (f) y profundidad de corte (a_p) [6]. El valor de estos parámetros dependerá de los mencionados anteriormente como el material a mecanizar, el desgaste de la herramienta etc.

En los procesos de mecanizado por arranque de viruta, el corte del filo de la herramienta que incide sobre la pieza puede ser de dos tipos, ortogonal y oblicuo.

Merchant definió en [7] el término “corte ortogonal” (Figura 2) como el corte en el que la herramienta genera una superficie plana paralela a la superficie plana original del material que se está cortando, siendo el filo de la herramienta de corte perpendicular a la dirección del movimiento relativo entre la herramienta y la pieza de trabajo. Por tanto, en el corte ortogonal el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del movimiento principal y en el corte oblicuo el filo de la herramienta forma un ángulo λ con respecto a la dirección del movimiento principal.

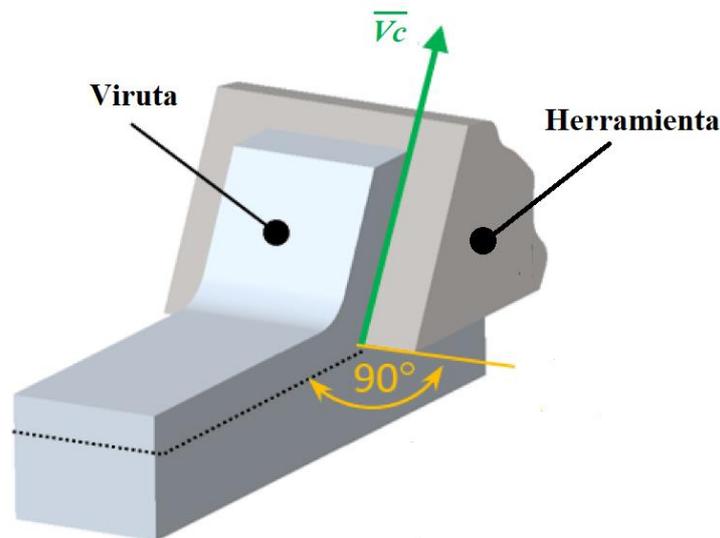


Figura 2. Corte ortogonal. Adaptado de [8].

El estudio del corte ortogonal es mucho más sencillo que el oblicuo ya que en las fuerzas de corte sólo intervienen dos componentes, mientras que en el corte oblicuo intervienen tres. El corte ortogonal es el caso más simplificado en mecanizados con arranque de viruta y se usa en la mayoría de las simulaciones de mecanizado de piezas mediante cálculos numéricos. Además,

como el ángulo de un corte oblicuo no suele superar los 15° no se comete demasiado error [9]. Sin embargo, en la realidad casi todos los procesos se llevan a cabo con corte oblicuo.

En la actualidad se han realizado muchos estudios usando el llamado *Modelo de Corte Ortogonal*, con el fin de poder estudiar de manera más simple aquellos parámetros que intervienen en un proceso de mecanizado. En este modelo de corte intervienen dos componentes de fuerza, fuerza tangencial o de corte F_c , y fuerza de avance F_a . Éstas dos componentes darán como resultante la fuerza F , la cual no actúa en el filo de la herramienta, sino que depende del valor del ángulo de desprendimiento γ (Figura 3).

El ángulo de desprendimiento γ , es el comprendido entre la cara de desprendimiento y la normal a la superficie de la pieza. Determina la deformación plástica del material provocando la separación de la viruta. También aparecen en el modelo de corte ortogonal el ángulo de filo β , y el ángulo de incidencia α .

El ángulo de incidencia α , es el comprendido entre la cara de incidencia y la superficie de la pieza. Evita el roce entre el talón de la herramienta y la superficie mecanizada. El ángulo de filo β , es el encargado de proporcionar la resistencia mecánica al filo de corte.

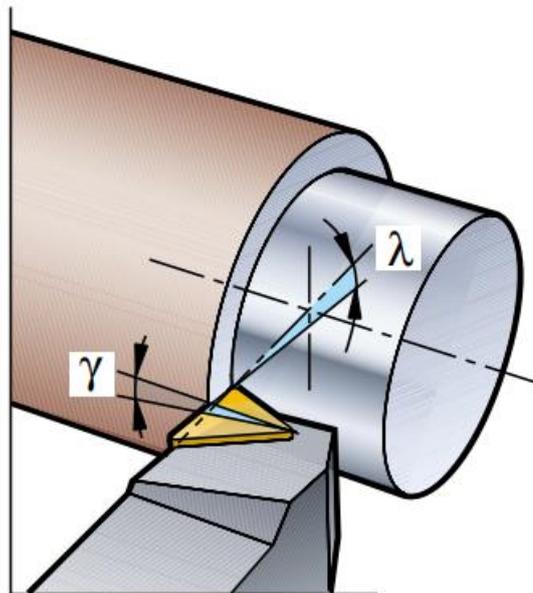


Figura 3. Ángulo de desprendimiento [10].

Por tanto, en este modelo, podemos escribir el vector fuerza como:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_a \quad (1)$$

2.2. Fuerzas de corte en el proceso de torneado

El torneado es una de las operaciones de mecanizado más usadas en la actualidad en las fábricas y se lleva a cabo en una máquina herramienta llamada torno. Consiste en un proceso de mecanizado mediante máquinas herramientas que genera piezas de revolución con herramientas de un solo punto de corte (Figura 4). Se caracteriza por:

- El movimiento fundamental de corte es rotativo y lo realiza la pieza.
- El movimiento de avance es lineal, realizado por la herramienta.



Figura 4. Torneado [10].

Se han realizado muchos estudios para optimizar la maquinabilidad de los materiales y estimar los diversos parámetros de corte utilizando diferentes técnicas de modelado con el fin de obtener las mejores características de mecanizado. Como ya se ha comentado en el punto 2.1 de este trabajo es de vital importancia la correcta elección de estos parámetros para garantizar un buen mecanizado. Los parámetros de corte que intervienen principalmente en un proceso de torneado [6] son:

- Velocidad del husillo principal N [rev/min]: Velocidad a la que gira la pieza.
- Velocidad de corte v_c [m/min]: Velocidad a la que el filo de corte mecaniza la superficie de la pieza. La velocidad es constante siempre que se mantengan constantes el diámetro a mecanizar y las revoluciones del husillo. Este parámetro suele ser el más influyente en la economía del proceso de mecanizado, por tanto, es importante seleccionar este parámetro de forma que exista un equilibrio entre coste y rendimiento. Si es demasiado pequeña, no se generan las fuerzas suficientes para que se produzca el corte.

$$v_c = \pi \cdot D \cdot N \quad (2)$$

- Avance f [mm/rev]: Es una forma de medir el avance, determinando el desplazamiento lineal de la herramienta por cada vuelta del husillo principal. Es un factor clave a la hora de determinar el acabado superficial de la pieza. En algunas bibliografías también se refieren al avance como a .
- Velocidad de avance v_f [m/min]: Es la velocidad a la que se mueve la herramienta de corte a lo largo de la pieza de trabajo.

$$v_f = a \cdot N \quad (3)$$

- Profundidad de corte a_p [mm]: La profundidad de corte es la diferencia entre la superficie sin mecanizar y la superficie una vez mecanizada. Se mide en ángulo rectos respecto a la dirección de avance de la herramienta, no al filo.

Se pueden ver algunos de estos parámetros representados en la Figura 5.

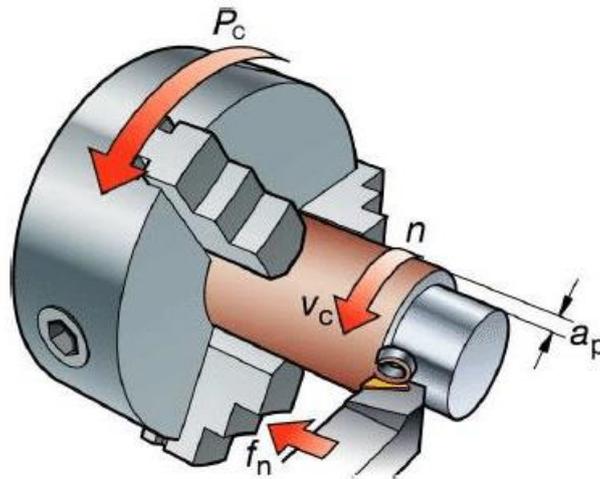


Figura 5. Parámetros de corte en torneado [11].

Además de estos parámetros, en el proceso de torneado también influyen otros parámetros tecnológicos como son:

- Ángulo de posición del filo principal, k_r .
- Ángulo de posición del filo secundario, k'_r .
- Radio de punta, r_ϵ .
- Ángulo de incidencia α y ángulo de desprendimiento γ . Se miden en un plano perpendicular al filo principal de corte y a la dirección principal de corte.
- Espesor de viruta, h [mm].

$$h = a \cdot \text{sen}(k_r) \quad (4)$$

- Ancho de la viruta, b [mm].

$$b = \frac{h}{\text{sen}(k_r)} \quad (5)$$

- Sección de la viruta, S_c [mm].

$$S_c = b \cdot h = f \cdot a_p \quad (6)$$

- Fuerza de corte, F_c [N]

$$F_c = p_s \cdot S_c \quad (7)$$

Siendo p_s la energía específica de corte [N/mm^2].

Como toda fuerza, la fuerza de corte tiene un carácter vectorial, por lo que se tendrá que evaluar en dirección, sentido y módulo. Al ser un vector, la fuerza se descompondrá en tres direcciones

ortogonales coincidentes con el avance de la herramienta, con la velocidad de corte y con la profundidad de corte [12]. Así se obtienen las componentes tecnológicas de la fuerza de corte:

- La componente tangencial F_c , es la más importante en magnitud y se suele tomar como la fuerza de corte. Es la encargada de llevar a cabo el esfuerzo cortante necesario para desprender la viruta del material.
- La fuerza de avance F_f , es la encargada de vencer la resistencia del material al movimiento de avance de la herramienta. Dependiendo de la bibliografía, la fuerza de avance también se suele nombrar F_a .
- La fuerza radial F_p , que contrarresta la reacción del material a ser penetrado. La dirección de la componente es perpendicular a la pieza. Suele tener valores mínimos, por lo que se suele despreciar.

En la Figura 6 se muestra la descomposición de fuerzas en un proceso de torneado.

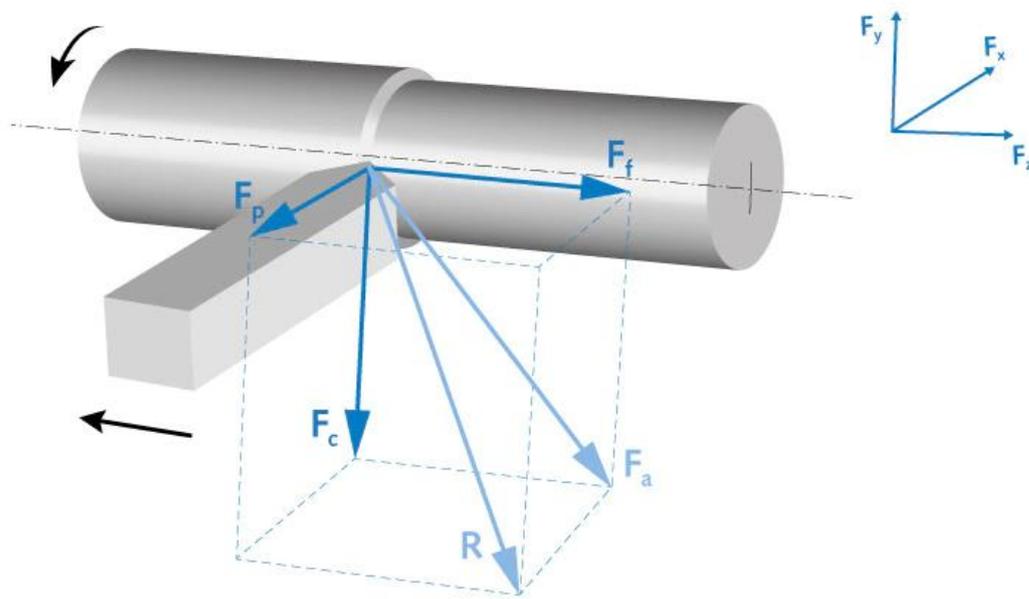


Figura 6. Reacciones a la fuerza de corte descompuesta en sus tres componentes [13].

Por tanto, los vectores velocidad y fuerza se pueden escribir como:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (8)$$

$$\vec{V} = \vec{v}_c + \vec{v}_f + \vec{v}_p \quad (9)$$

Análogamente, desde un punto de vista energético, la energía consumida por unidad de tiempo se puede estimar como el producto escalar de ambos vectores:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} = F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f + F_p \cdot v_p \quad (10)$$

Como se dijo antes la F_c es la fuerza de mayor magnitud, siendo normalmente despreciable F_a y F_p . Análogamente ocurre lo mismo con las velocidades, siendo v_c la de mayor magnitud, y v_a y

v_p despreciables en valor frente a ella. Por lo que, simplificando, se puede escribir la potencia con gran aproximación:

$$P = F_c \cdot v \quad (11)$$

2.3. Técnicas de medición de fuerzas en el proceso del mecanizado

Como se ha explicado anteriormente, en los procesos de arranque de viruta intervienen muchos factores influyentes, por lo que la medición de las fuerzas de corte será un factor clave para conocer el desarrollo, selección y evaluación de herramientas, medios de sujeción, lubricantes, y materiales de trabajo. Los datos obtenidos pueden aumentar la productividad y vida útil de las herramientas.

Las fuerzas de corte se pueden medir con diversas tecnologías, pero la opción más usada en el proceso del mecanizado es la del dinamómetro (Figura 7), debido a que son muy fiables y efectivos. El dinamómetro fue el primer instrumento que se usó para medir fuerzas. Se ideó por el físico Isaac Newton a finales del siglo XVII aplicando los principios de la ley de elasticidad de Hooke según el cual el estiramiento de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza que se ejerce sobre el mismo. Dentro de los dinamómetros encontramos principalmente dos tipos diferentes:

- **Dinamómetro mecánico:** Se basan en el dinamómetro tradicional desarrollado por Newton. Tiene un sistema completamente mecánico. Son los más usados en la actualidad debido a su precisión y seguridad. Tiene una desviación máxima de un 0.3%. El principal punto débil de los medidores mecánicos es su dependencia de la temperatura y la lectura inexacta del ojo humano.
- **Dinamómetro digital o electrónico:** Utilizan instrumentos de medición digitales. Tiene un mecanismo mucho más complejo y requiere de fuentes de energía para su funcionamiento. Cuentan con una interfaz de datos y en algunos casos también cuentan con un software encargado de transferir estos datos hasta el ordenador. Su uso se centra en la investigación y el desarrollo.



Figura 7. Dinamómetro mecánico (a) y digital (b) [14].

En la actualidad se puede encontrar dinamómetros para medir la fuerza de corte en un mecanizado con una alta precisión, usados principalmente para investigaciones. Estos dinamómetros utilizan complejos transductores. Los más usados actualmente son los que utilizan galgas extensiométricas y los que se basan en el efecto piezoeléctrico.

El dinamómetro con galgas extensiométricas se basa en el dinamómetro tradicional, pero usa una galga que se encarga de medir con gran precisión la deformación producida a través de una alteración de su resistencia debido a su cambio de longitud. En la Figura 8 se muestra un esquema de una galga extensiométrica.

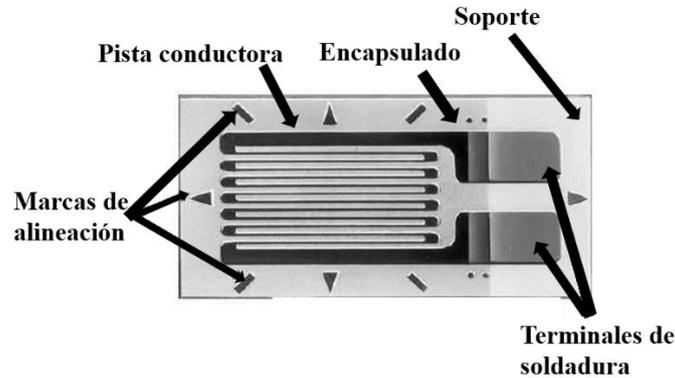


Figura 8. Galga extensiométrica impresa uniaxial, indicando sus diferentes partes.

Para la medida de la variación de resistencia, el aparato utilizado está basado esencialmente por un circuito en Puente de Wheatstone (Figura 9).

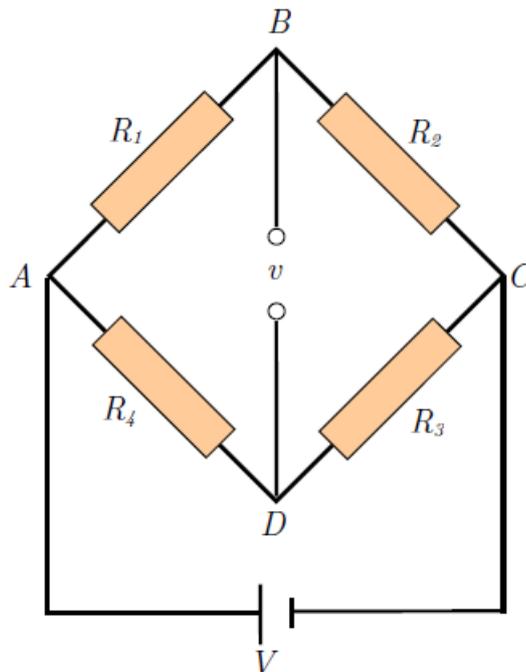


Figura 9. Puente de Wheatstone .

La característica fundamental de las galgas extensiométricas es que la variación de resistencia eléctrica ΔR es proporcional a la variación de longitud.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} \quad (12)$$

Siendo:

- R : Resistencia eléctrica de la galga
- l : Longitud de la galga
- Δl : Variación de longitud
- K : Factor de galga

A esta expresión se la conoce como la ecuación fundamental de la extensometría.

El dinamómetro piezoeléctrico se basa en el efecto piezoeléctrico, una propiedad que tienen ciertos materiales para generar una carga eléctrica bajo tensión mecánica. Esta carga se captura en la superficie del cristal y se convierte en una señal de tensión por medio de un amplificador de carga. Son más caros que los de galgas, pero también más precisos. Como desventaja tiene que la carga eléctrica es muy volátil por lo que, si no hay un aislamiento perfecto, la carga se pierde con el tiempo. Esto dificulta las mediciones estables a largo plazo, especialmente si se desea medir fuerzas pequeñas. La principal ventaja es que la deformación generada es extremadamente pequeña ya que el efecto de carga es causado por cambios dentro de la estructura atómica. Esto permite la realización de estructuras extremadamente rígidas con frecuencias naturales altas.

Comparando los sensores extensométricos con los piezoeléctricos, los primeros tienen las siguientes ventajas [15]:

- Mayor variedad de aplicaciones.
- Fáciles de utilizar en comparación.
- Alcanzan una gran precisión (Índice de errores de medición inferior al 0.1%).
- Aislamiento de cables y movimiento de cables no problemáticos.
- Medición sin deriva incluso durante periodos prolongados.
- compensación de las fluctuaciones de temperatura a través del puente de Wheatstone.
- Más baratos que los sensores piezoeléctricos.

Por otro lado, los sensores piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Especialmente adecuados para procesos cuasiestáticos y dinámicos.
- Detección de cambios de carga altamente dinámicos en el rango de hasta un milisegundo.
- Rango de medición muy amplio de hasta seis décadas.
- Los parámetros metrológicos como la sensibilidad, el umbral de respuesta y la resolución son independientes del tamaño del sensor.
- Estructura muy compacta.
- Resistentes a temperaturas muy altas y a la sobrecarga.
- Libres de fatiga, vida útil prolongada y gran estabilidad a largo plazo.

2.4. Dinamómetro piezoeléctrico

Este trabajo se enfocará en el uso del dinamómetro piezoeléctrico para la medición de fuerzas. Este tipo de dinamómetro se basa en el principio físico piezoeléctrico que ocurre en algunos materiales. Un material piezoeléctrico es aquel que tiene la capacidad de desarrollar carga eléctrica interna cuando se le aplica una tensión mecánica. La fuerza de actuación modifica la estructura microscópica del material, generando dipolos entre los que se acumula tensión. También puede ocurrir una inversión, al aplicar una tensión el material piezoeléctrico puede deformarse elásticamente. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible, es decir, al dejar de someter los cristales a un voltaje recuperan su forma.

Existen diferentes materiales piezoeléctricos desde los piezoeléctricos naturales hasta diversos materiales piezoeléctricos artificiales como las cerámicas y polímeros piezoeléctricos. Son

materiales piezoeléctricos el hueso, cristales, ciertas cerámicas etc. Entre los materiales piezoeléctricos destaca el cristal de cuarzo. Las ventajas que tiene este cristal frente a otros materiales piezoeléctricos es que no son pirotécnicos, es decir que son resistentes a los cambios de temperatura.

El efecto piezoeléctrico tiene un gran número de aplicaciones:

- Procesos industriales.
- Producción automovilística.
- Moldeo por inyección.
- Tecnología médica.
- Tecnología aeronáutica.
- Tecnología astronáutica.
- Tecnología ferroviaria.
- Biomecánica.
- Termoacústica.
- Etc.

Los sensores piezoeléctricos (Figura 10) son la base para los sistemas de supervisión de procesos con análisis de datos para obtener unos resultados de producción óptimos. Poseen numerosas ventajas como un amplio rango de medición, recorridos de medición cortos, gran estabilidad a largo plazo y protección contra sobrecargas. Dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada el efecto piezoeléctrico se produce longitudinal, transversal o diagonalmente como efecto de corte, lo que permite diferentes variaciones de instalación de un sensor en una máquina.



Figura 10. Sensores piezoeléctricos [16].

2.5. Otros estudios

Los procesos de mecanizado se utilizan para la fabricación de piezas que requieren de una precisión y de un acabado superficial óptimo. Para lograr estos resultados se han estudiado todos los parámetros involucrados en el proceso de corte. Por ello, recientemente se han hecho muchos estudios relacionados con el monitoreo del proceso de corte [19–21] para evitar la fabricación de piezas defectuosas. Las técnicas de monitorización más usadas son para la medición de las fuerzas de corte, vibraciones, temperaturas, sonido, emisiones acústicas etc.

En [18], R. Teti et al. hicieron un estudio sobre el desarrollo e implementación de monitoreo de sensores de operaciones de mecanizado. Su trabajo se basa en los estudios del CIRP [22–24] y lo actualizan con las últimas tecnologías de sensores y procesamiento de señales. La futura mejora de los sistemas de mecanizado dependerá del desarrollo e implementación de nuevos sistemas de monitorización con sensores. Estos sensores han de ser cada vez más pequeños, complejos y de

alta precisión, además de ser económicamente rentables para satisfacer las demandas de la tecnología de fabricación avanzada.

En [20], Tlusty y Andrews investigaron sobre el desarrollo de sensores efectivos para el monitoreo para operaciones de mecanizado. El problema crucial para alcanzar el máximo potencial de los centros de mecanizado no tripulados es el desarrollo de sensores fiables y eficaces para controlar el funcionamiento de la máquina herramienta. También escribieron sobre las aplicaciones de estos sensores para correcciones geométricas, monitorear el desgaste y rotura de la herramienta y el funcionamiento seguro del husillo.

En [21], Tonshoff et al, describieron métodos para el monitoreo y control de procesos de mecanizado. Como conclusión obtuvieron que estos métodos de monitorización del mecanizado aumentan significativamente la capacidad de control y fiabilidad de los procesos de mecanizado.

En [22], Byrne et al, analizaron la monitorización de un proceso de mecanizado enfocado en las condiciones de la herramienta. Este trabajo habla de los procesos de mecanizado tales como el torneado, fresado, taladrado y rectificado haciendo énfasis en el fallo catastrófico, la fractura y el desgaste progresivo de la herramienta.

De acuerdo con [18], las técnicas de medición para la monitorización de las operaciones de mecanizado se pueden clasificar en dos enfoques, directos e indirectos:

- **Medición directa:** En esta técnica de medición se mide directamente el valor real de la variable con una alta precisión, por ejemplo, el desgaste de la herramienta [27-28]. Este método se usa mucho en laboratorios de investigación ya que tienen algunas limitaciones prácticas provocadas por los problemas de acceso durante el mecanizado, la iluminación y el uso de fluidos de corte. Ejemplos de medición directa puede ser para el uso de cámaras de inspección visual rayos láser etc. La medición directa se usa en laboratorios de investigación para respaldar las investigaciones de fenómenos medibles durante los procesos de mecanizado. Se han realizado muchos estudios sobre esta técnica de medición.
- **Medición indirecta:** En esta técnica de medición el valor real se deduce posteriormente usando correlaciones determinadas empíricamente. Es menos preciso que el método directo, pero también es mucho menos complejo, por tanto, es más adecuado para aplicaciones prácticas. A diferencia de la detección tradicional de las condiciones de la herramienta, en este enfoque se monitorean continuamente los procesos de mecanizado a través de dispositivos de detección para cuantificar el rendimiento del mecanizado o proporcionar información para la optimización del proceso mediante sensores. Los métodos indirectos basados en la medición de fuerzas de corte [29-32], vibraciones [33-39], emisiones acústicas [40-41] y la corriente de alimentación/motor [42-44] son los más empleados y estudiados en la actualidad.

Centrándonos en las fuerzas de corte, como se ha explicado en los puntos anteriores la predicción de las mismas juega un papel muy importante en la investigación de procesos de corte de metales y en el diseño de herramientas de corte [41]. Estos estudios juegan un papel muy importante en la predicción del desgaste de la herramienta, análisis térmico, predicción de vibraciones, de la forma de la viruta, rugosidad superficial, etc. Además, una gran fuerza de corte significa un mayor consumo de energía.

En [42], Deng et al. realizaron un estudio sobre la reducción de la fuerza de corte mediante la correcta elección de parámetros y herramientas de corte. Este artículo presenta las fórmulas teóricas de cálculo para la fuerza de corte para un torneado cilíndrico haciendo uso de nuevas herramientas de contacto. Estas fórmulas se basan en el principio de la energía mínima. Los

resultados de este estudio muestran que las fórmulas computacionales teóricas derivadas pueden predecir la fuerza de corte, con una precisión razonable.

Kim y Kim en [43], explica que las fuerzas de corte se pueden dividir en fuerzas estáticas y fuerzas dinámicas. La mayoría de los dinamómetros monitoreaban la fuerza de corte estática, por lo que, en este trabajo los investigadores desarrollaron un dinamómetro capaz de medir la fuerza de corte estática y dinámica combinadas mediante el uso de galgas extensiométricas y un acelerómetro piezoeléctrico.

De acuerdo con Childs et al. [44], las fuerzas de corte se pueden medir de dos maneras diferentes:

- Directa: La medición directa implica montar la herramienta en el dinamómetro, que responde a las fuerzas mediante señales eléctricas. Esta técnica de medición se utiliza cuando se necesita conocer las fuerzas con precisión tanto en magnitud como en dirección. Por ejemplo, si se requieren las fuerzas de empuje avance y corte principales en un proceso de torneado
- Indirecta: Los métodos indirectos son menos precisos que los métodos directos ya que involucran deducciones del comportamiento de la máquina herramienta.

El instrumento de medición de fuerza más utilizado es el dinamómetro como ya se ha explicado en puntos anteriores. El transductor de par/fuerza se puede construir utilizando galgas extensiométricas o piezoeléctricas. La principal ventaja del dinamómetro utilizando galgas extensiométricas es su precio, unas 20 veces menor al que usa métodos piezoeléctricos.

Yaldiz y Ünsaçar [45] diseñaron un dinamómetro para torneado que puede medir fuerzas de corte estáticas y dinámicas mediante el uso de galgas extensiométricas y acelerómetros piezoeléctricos, respectivamente. Este dinamómetro consta de cuatro anillos octogonales elásticos sobre los que se montaron galgas extensiométricas y se realizaron las conexiones necesarias para formar los puentes de medición de Wheatstone. Este dispositivo es capaz de medir los 3 componentes de la fuerza de corte. Posteriormente en [46], Yaldiz et al. desarrollaron un dinamómetro para fresado que también podía medir las fuerzas de corte estáticas y dinámicas.

Topal y Çoğun [47] realizaron un estudio con el objetivo de compensar los errores dimensionales de la pieza de trabajo inducidos por la fuerza de corte en operaciones de torneado CNC. Para ello construyeron un dinamómetro para la medición de fuerzas de corte basado en galgas extensiométricas. Midieron las fuerzas de corte y las registraron en un ordenador bajo varias condiciones de mecanizado. Desarrollaron un método de compensación basado en la generación asistida por ordenador de una trayectoria de herramienta alternativa, que es simétricamente inversa a las características del error. Con el trabajo de estos investigadores se redujo el error de diámetro de la pieza de trabajo inducido por la fuerza de corte en un 90% aproximadamente.

Panzer et al. [48] realizó un estudio basado en la construcción de un dinamómetro de galgas extensiométricas diseñado para medir las 3 componentes de la fuerza de corte en un proceso de torneado. También investigaron el efecto de los parámetros de corte en los componentes de la fuerza y los resultados indicaron que los 3 componentes de la fuerza de corte disminuyen ligeramente a medida que aumenta la velocidad de corte y aumentan linealmente con la velocidad de avance y profundidad de corte.

En un mecanizado, las fuerzas de corte tienen una gran influencia sobre el consumo energético de las máquinas herramientas. En la actualidad se han realizado muchos estudios sobre ello. En [49], Hernández-González et al. estudiaron los efectos de los materiales de las herramientas de corte y su velocidad sobre las fuerzas de corte y el consumo específico de energía en el torneado en seco de alta velocidad de acero AISI 1045. Los valores más bajos de consumo de energía se alcanzaron para una velocidad de corte intermedia.

Actualmente se realizan muchos estudios para conocer las fuerzas de corte dependiendo del material y los parámetros de corte. En [50] Dijmarescu se centra en la investigación de las fuerzas de corte desarrolladas durante un proceso de torneado en seco de una aleación CoCrW_{Ni} utilizado en aplicaciones médicas. Los resultados revelan la variación de las fuerzas de corte en torneado en relación con los parámetros de corte y amplían la base de conocimiento desarrollada por otros estudios existentes.

En [51], Polishetty et al. analiza el efecto de parámetros de mecanizado como la velocidad de corte y la velocidad de avance en la fuerza de corte y la rugosidad superficial durante un proceso de torneado de aleaciones de titanio fabricada con aditivos Ti-6Al-4V. En [52] Mahamani hace un análisis similar con AA2219-TiB₂/ZrB₂.

En 1977 Trent, en su libro Metal cutting [53], demostró que el mecanizado está relacionado con el proceso de formación de virutas. En el mecanizado de materiales dúctiles como el aluminio, el área de contacto herramienta-viruta suele ser grande durante el proceso de corte. El grosor de la viruta también es alto, lo que da lugar a la fuerza de corte y aumenta la potencia requerida. Esta gran área de contacto entre la herramienta y la viruta y el alto grosor de la misma aumenta aún más la generación de calor. Debido a esto el acabado superficial es deficiente. Sin embargo, en el caso de una aleación de aluminio la resistencia al corte es baja lo que facilita mucho su mecanizado. En [54], se presenta y discuten los principales factores de mecanizado que gobiernan directa e indirectamente la maquinabilidad de la aleación de aluminio.

Las fuerzas de corte son generalmente bajas en el caso de mecanizado de aleaciones de aluminio debido a su baja resistencia mecánica. Muchos investigadores desarrollaron artículos sobre el estudio de las fuerzas de corte en este material [57–59].

En [60-61], los investigadores demuestran que cualquier proceso que aumente la resistencia y duración de la aleación de aluminio puede disminuir las fuerzas de corte debido a la reducción del área de contacto entre la herramienta y la viruta. Normalmente durante el mecanizado de cualquier aleación de aluminio las fuerzas de mecanizado tienden a disminuir con el aumento de la velocidad de corte independientemente de la resistencia del material [62–64], sin embargo, las fuerzas de corte se reducen con un aumento en las velocidades de corte debido al ablandamiento térmico [65-66]. En la Figura 11 se puede ver representado la fuerza de corte en función de la velocidad de corte.

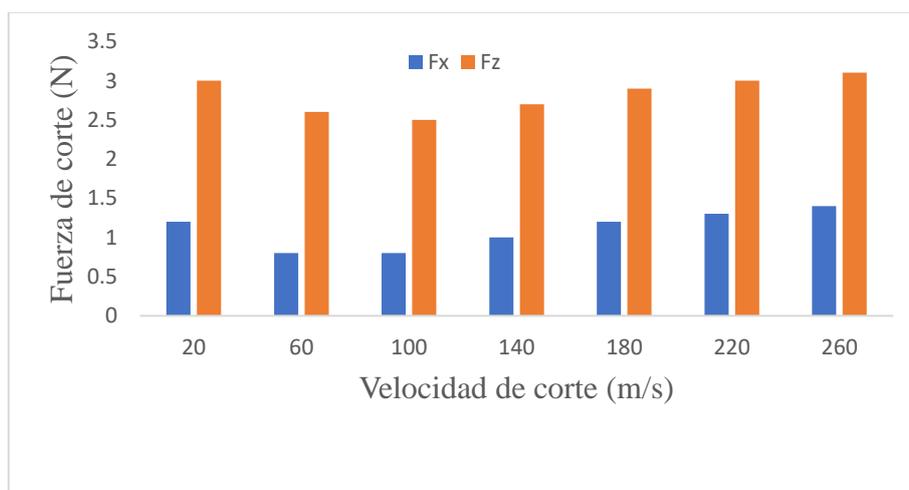


Figura 11. Variación de la fuerza de corte con respecto a la velocidad de corte. Adaptado de [63].

Otro tipo de aleación ligera muy usada en la actualidad es la aleación de titanio. El titanio se usa en la industria aeroespacial, marina, médica y química entre otras, debido a sus buenas propiedades como la alta resistencia a la corrosión.

Sin embargo, el titanio es un material difícil de mecanizar debido a ciertas propiedades como una pobre conductividad y su alta reactividad química [67–69]. Debido a esto el titanio es un material que tiene un uso limitado en la industria dado su alto coste de mecanizado.

Las fuerzas de corte durante el mecanizado de aleaciones de aluminio son inferiores a las obtenidas durante el mecanizado de aceros [54]. A temperaturas elevadas las aleaciones de titanio muestran una buena resistencia a la deformación.

Debido a las buenas propiedades de este material muchos investigadores han realizado estudios sobre el mismo. En [68], Polishetty et al, realizaron un estudio para comprobar el efecto de parámetros de corte como la velocidad de corte y la velocidad de avance en las fuerzas de corte y el acabado superficial en una operación de torneado, realizado sobre una aleación de titanio Ti-6Al-4V. Llegaron a la conclusión de que una alta velocidad de corte y de avance conlleva a una alta fuerza de corte y un acabado superficial pobre.

2.6. Conclusión

Cada vez es más habitual realizar mediciones de fuerza para el uso de maquinaria CNC para el desarrollo de estrategias de mecanizado más efectivas. Como se ha explicado en puntos anteriores el monitoreo del proceso de corte es esencial no solo para optimizar el rendimiento del mecanizado sino también para garantizar la seguridad del trabajador. Con ello podemos reducir costes, alargar la vida de la herramienta, optimizar los tiempos de trabajo etc.

Con los estudios analizados anteriormente se puede concluir que los parámetros de corte más influyentes en un mecanizado son la velocidad de corte y el avance. En [69], Kannan et al estableció un modelo matemático donde concluyó que el parámetro que más afecta a las fuerzas de corte es la velocidad de avance. A más velocidad de avance más fuerzas de corte. Además, la rugosidad superficial también se ve afectada principalmente por el avance.

En la actualidad se usan mucho las aleaciones ligeras en mecanizados dadas sus buenas propiedades mecánicas. En este trabajo se profundizará en dichas aleaciones para comprobar su comportamiento cuando se somete a un determinado proceso de conformado por arranque de viruta.

CAPÍTULO 3. Metodología experimental

Tal y como se ha comentado en puntos anteriores la industria aeronáutica ha experimentado un alto crecimiento en los últimos años debido a la gran demanda de aviones. Por ello son cada vez más las investigaciones referentes a los materiales usados en estas industrias. En este contexto las aleaciones ligeras surgieron como una buena solución debido a sus óptimas propiedades mecánicas y su poco peso.

Dentro de este marco de investigación se encuentra este trabajo. El grupo TEP933 de la Universidad de Málaga ha adquirido un equipo de medición de fuerzas con el cual se van a analizar las propiedades de estos materiales sometidos a un ensayo de torneado. El equipo adquirido es un dinamómetro piezoeléctrico de la marca Kistler modelo 9129AA (Figura 12). Es un dinamómetro multicomponente para la medición de fuerzas en sus tres componentes, y para la medición de momentos también en sus 3 componentes [70]. Como características destaca su amplio rango de medición, tiene un error mínimo de temperatura además de un tamaño pequeño. El dinamómetro consta de cuatro sensores de fuerza de 3 componentes, montados entre la placa superior y las dos placas laterales. Debido a este montaje de los sensores se consigue un error pequeño de temperatura. Cada uno de los sensores de fuerza contiene 3 discos de cristal, uno de ellos es sensible a la presión en la dirección y , y los otros 2 miden la fuerza de corte en las direcciones x y z (Figura 13). Los cuatro sensores tienen una toma a tierra incorporada. Además, el dinamómetro es resistente a la corrosión y está protegido frente a la entrada del refrigerante. Los dinamómetros de cuarzo multicomponentes miden de manera sencilla, directa y con mucha precisión.



Figura 12. Dinamómetro Kistler modelo 9129AA [70].

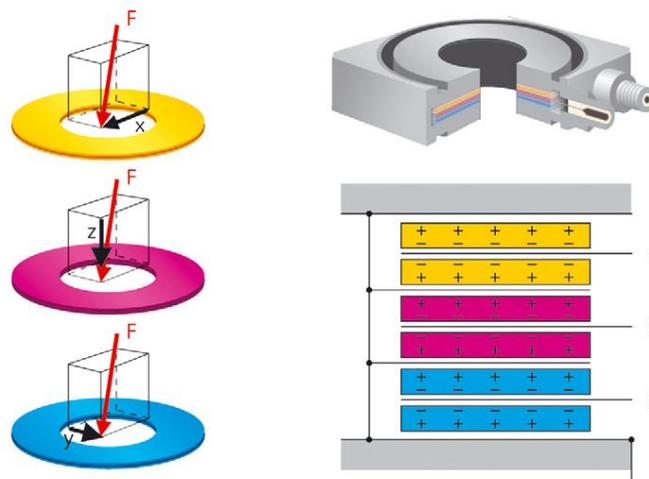


Figura 13. Disposición de sensores de fuerza en el dinamómetro multicomponente [71].

En este apartado se explicarán las características técnicas del dinamómetro, así como la puesta a punto del equipo y de su software asociado. Tras ello se realizará una monitorización del proceso para un posterior análisis de los datos ofrecidos por el software. Por último, se redactará una breve guía rápida de uso. En la Figura 14 se representa en un diagrama de flujo un esquema general de la metodología experimental empleada en este trabajo.

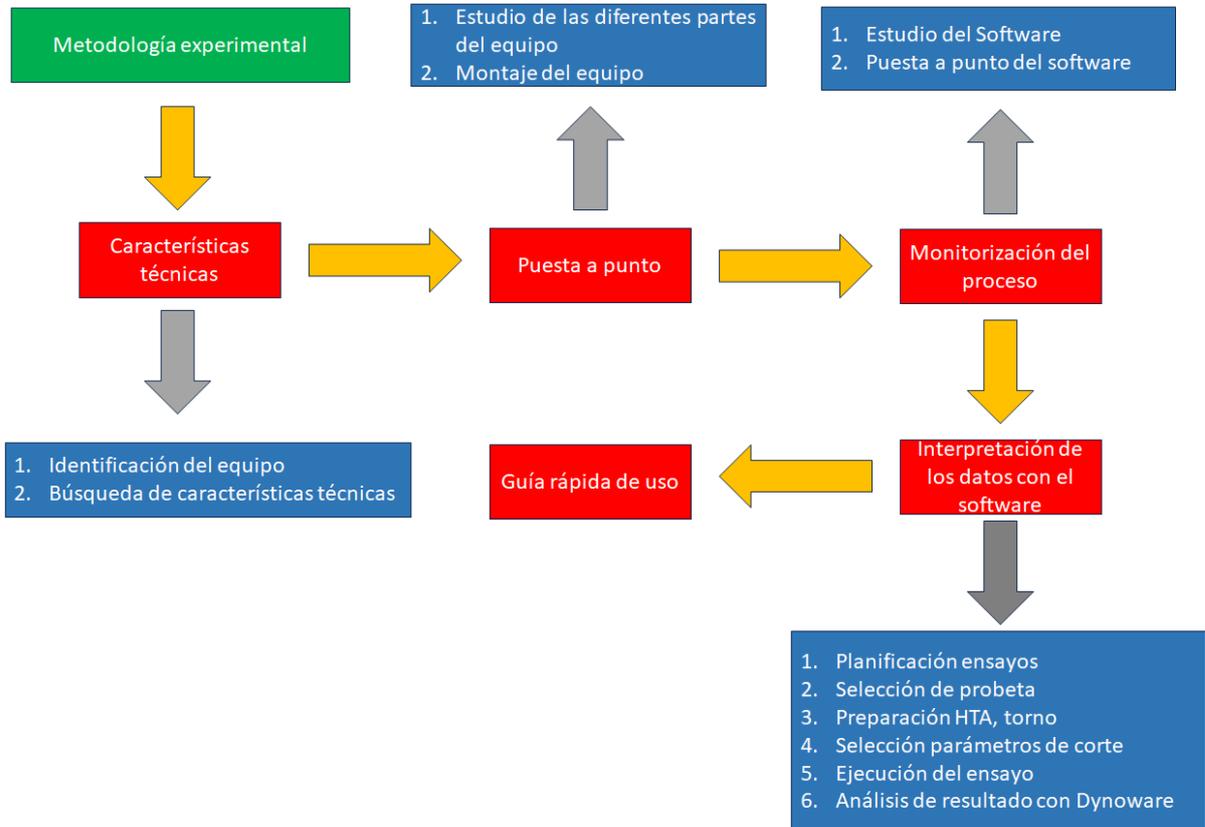


Figura 14. Esquema general de la metodología experimental.

3.1. Características técnicas del equipo

En este apartado especificaremos las características técnicas del equipo utilizado. En la Figura 15 se puede ver una imagen del mismo.

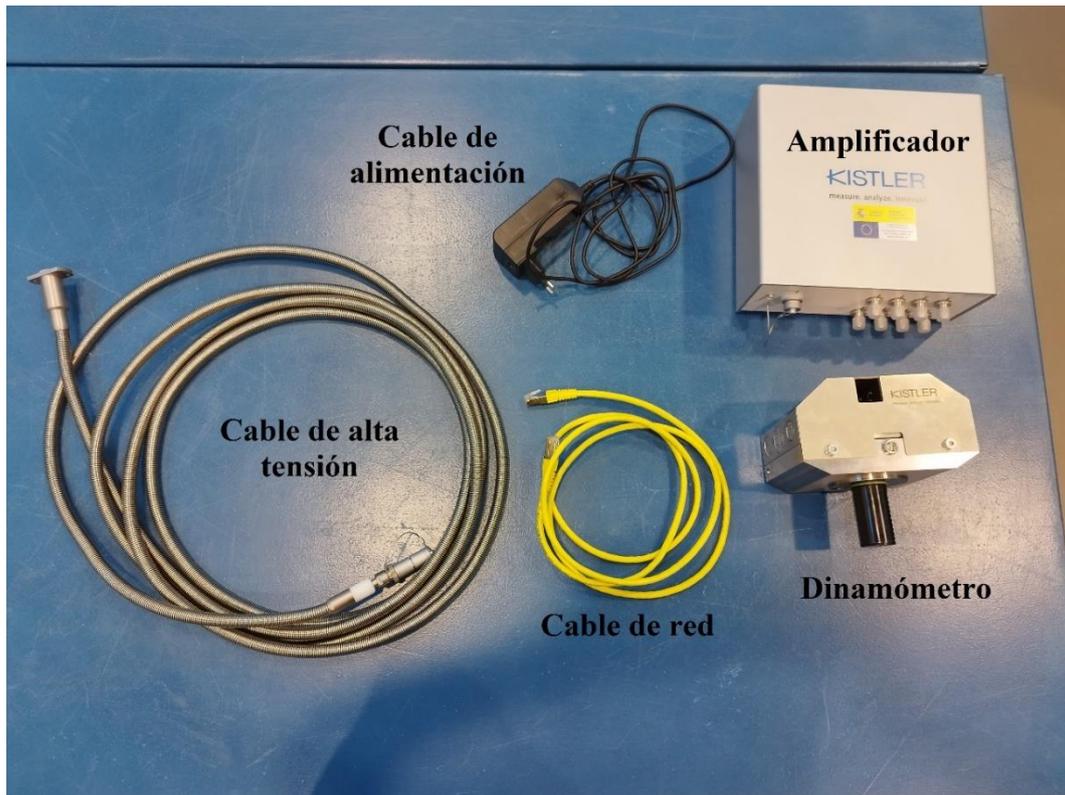


Figura 15. Equipo utilizado.

En la imagen anterior se puede distinguir:

- Cable de alta tensión.
- Cable de red.
- Cable de alimentación.
- Dinamómetro piezoeléctrico.
- Amplificador.

3.1.1. Cable de alta tensión

El cable de alta tensión, Figura 16, es un cable tipo 1687B5, con cubierta metálica flexible para dinamómetros multicomponentes con conector de 9 pines. Es el encargado de pasar la corriente desde el amplificador al dinamómetro.

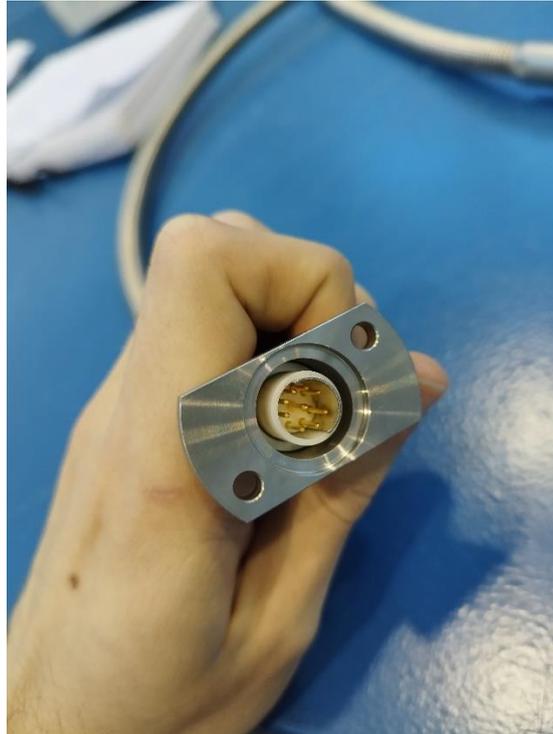


Figura 16. Cable de alta tensión.

Las características técnicas están descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas cable tipo 1687B5.

Tipo de conexión	9 pines
Tipo de protección	Manguera flexible de acero inoxidable
Rango de temperatura	-5 ... 70 °C
Grado de protección EN 60529	IP67, IP65
Longitud	5 m
Numero de conductos	3
Uso	Dinamómetros multicomponentes

3.1.2. Cable de red.

El cable de red, Figura 17, es el encargado de trasladar la información medida desde el amplificador hasta el ordenador.



Figura 17. Cable de red.

3.1.3. Amplificador.

El amplificador tipo 5167A81, Figura 18, es un potente dispositivo de adquisición de datos que entrega los valores medidos por el dinamómetro directamente al ordenador para su posterior análisis. Gracias a su capacidad de medir señales cuasiestáticas, este amplificador es particularmente adecuado para mediciones de fuerza de múltiples componentes, con dinamómetros piezoeléctricos, en diversas aplicaciones en el laboratorio, así como en investigación y desarrollo. Los sensores piezoeléctricos producen una carga eléctrica que es directamente proporcional a la carga que actúa sobre el sensor. El amplificador convierte esta carga en valores digitales o en un voltaje de salida proporcional.



Figura 18. Amplificador Kistler.

Las dimensiones del amplificador son las reflejadas en la Figura 19:

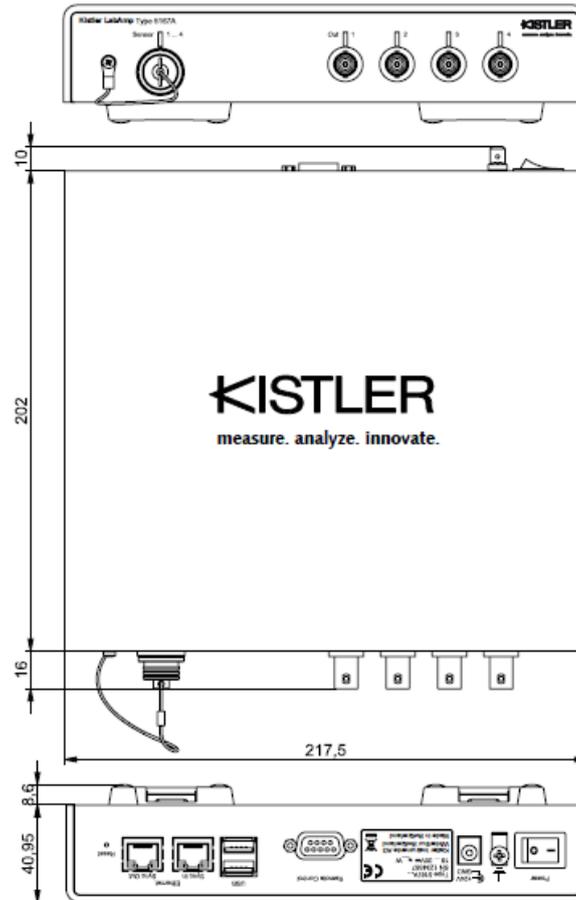


Figura 19. Dimensiones amplificador [72].

Los datos técnicos de este dispositivo se pueden ver en la Tabla 2:

Tabla 2. Características técnicas amplificador tipo 5167A81.

Frecuencia de señal máxima	45 kHz
Número de canales	8
Rango de temperatura	0 ... 60 °C
Tipo de señal de salida	Internet, Voltaje

3.1.4. Dinamómetro.

Como se explicó anteriormente el dinamómetro utilizado para este proyecto es el dinamómetro multicomponente tipo 9129AA de la marca Kistler. Es un dinamómetro multicomponente para la medición de las 3 componentes del vector fuerza resultante y las 3 componentes del vector momento resultante. Además del dinamómetro, también se usará un adaptador para la máquina-herramienta tipo 9129AB30 y un portaherramientas tipo 9129AE20. En la Figura 20 se pueden ver las 3 partes montadas.

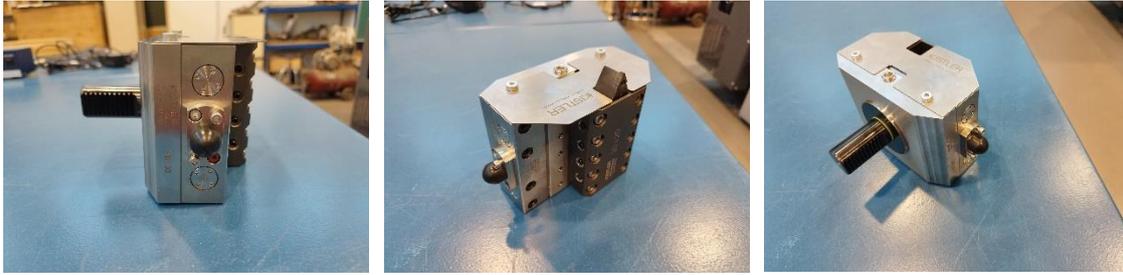


Figura 20. Dinamómetro con portaherramientas y adaptador.

En la Figura 21 se puede ver la disposición de los sensores y las dimensiones del dinamómetro.

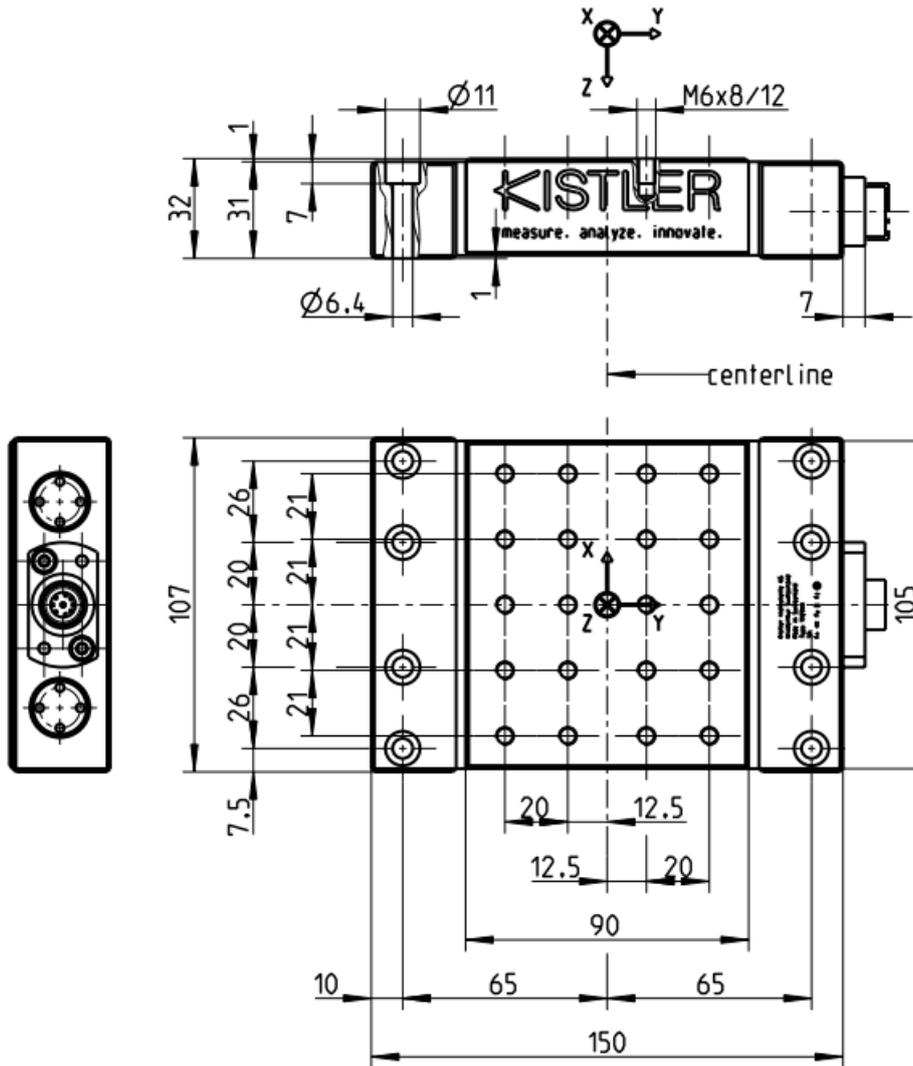
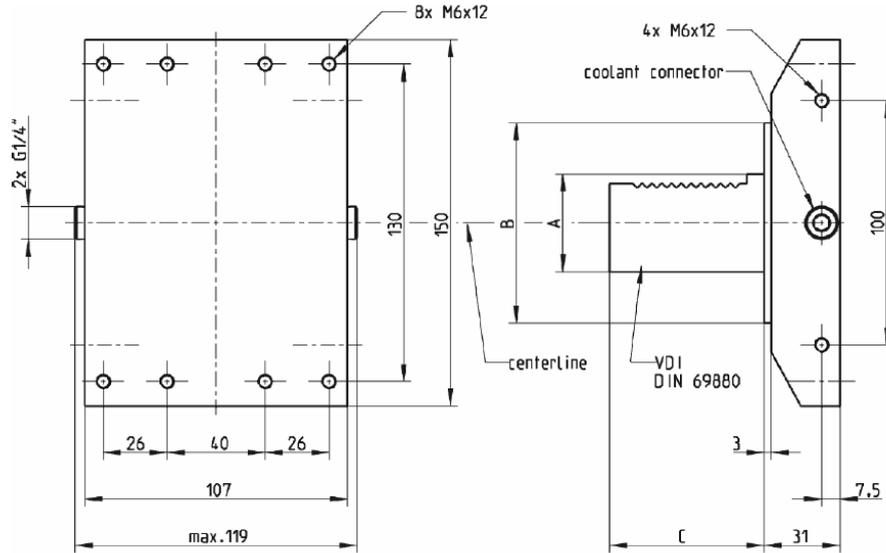


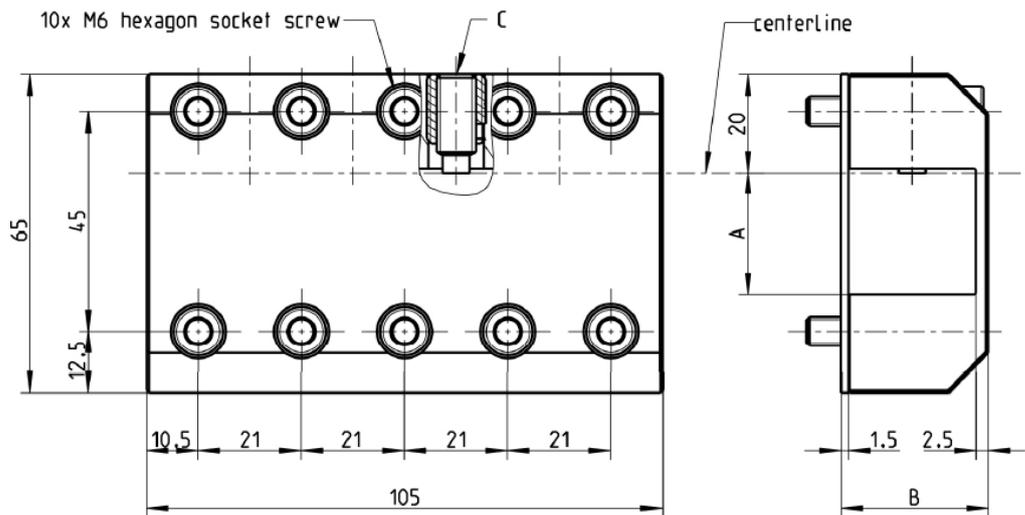
Figura 21. Dimensiones dinamómetro multicomponente tipo 9129AA [73].

En la Figura 22 y la Figura 23 se pueden ver las dimensiones tanto del portaherramientas como del adaptador.



Type	A	B [mm]	C [mm]	Weight [g]
9129AB30	VDI 30	67	55	≈3 460
9129AB40	VDI 40	82	63	≈3 870
9129AB50	VDI 50	97	78	≈4 400

Figura 22. Dimensiones adaptador tipo 9129AB [73].



Type	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Weight [g]
9129AE20	20	25	SW 3	≈430
9129AE25	25	30	SW 4	≈490
9129AE0,75	¾" (19,05)	24,05	SW 3	≈455
9129AE1	1" (25,4)	30,4	SW 4	≈490

Figura 23. Dimensiones portaherramientas 9129AE [73].

Las características técnicas del dinamómetro son las reflejadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Características técnicas Dinamómetro piezoeléctrico tipo 9129AA.

Rango de medición	-10...10 kN	Sensibilidad	Fx: -8 pC/N, Fy: -4,1 pC/N, Fz: -8 pC/N
Tipo de sensor de fuerza	Dinamómetro multicomponente	Rango de temperatura de funcionamiento	0... 70°C
Rango de medición Mx,My,Mz	-500...500 Nm	Rango de medición Fx,Fy,Fz	-10...10 kN
Grado de protección EN 60529	IP67	Peso	3.2 kg
Tolerancia	<0.01 N	Tipo de conexión	Conector de 9 pines

3.2. Puesta a punto del equipo

En cuanto a la puesta a punto comenzamos realizando el montaje del equipo utilizado.

Primero conectamos el dinamómetro al amplificador mediante un cable de alta tensión. Para ello quitamos el tapón de seguridad que tienen tanto el dinamómetro, como el cable de alta tensión (Figura 24), y mediante la conexión de 9 pines, conectamos dichas partes.

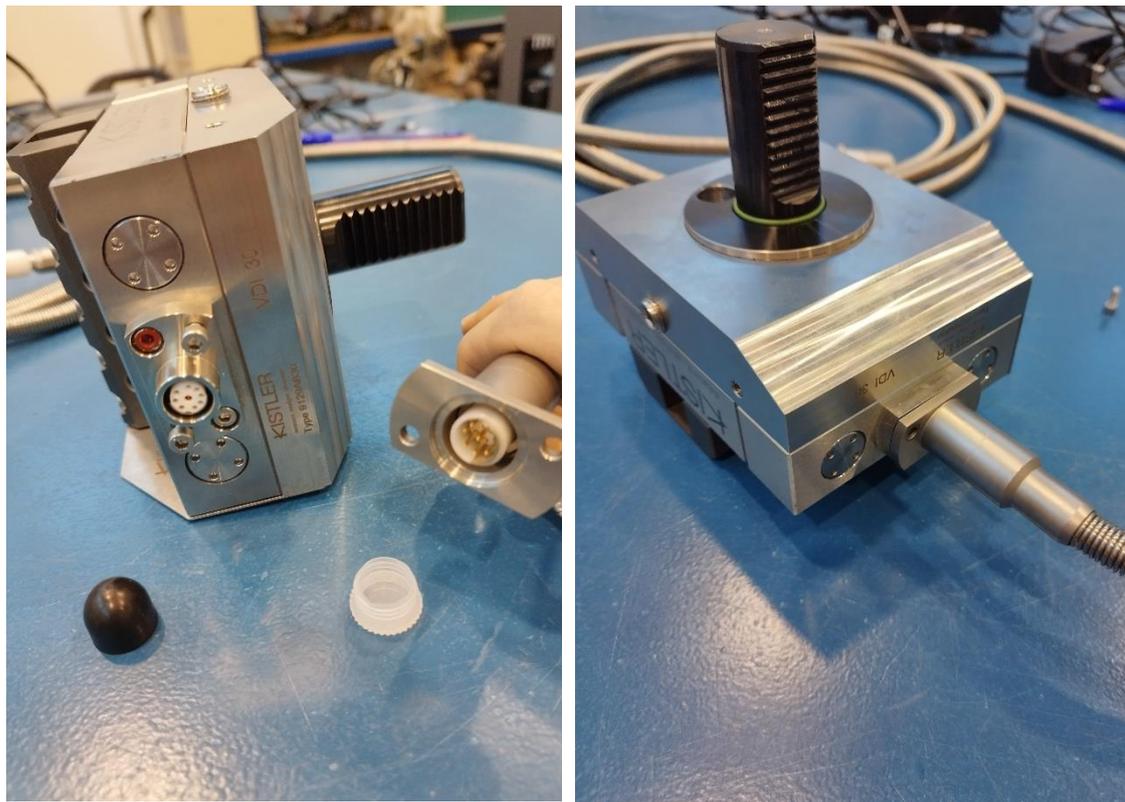


Figura 24. Conexión dinamómetro.

El amplificador por su parte también tiene un tapón de seguridad (Figura 25), el cual se ha de desconectar. Posteriormente se une el cable con el amplificador, además de sus respectivos tapones de seguridad (Figura 26).



Figura 25. Tapón de seguridad amplificador.

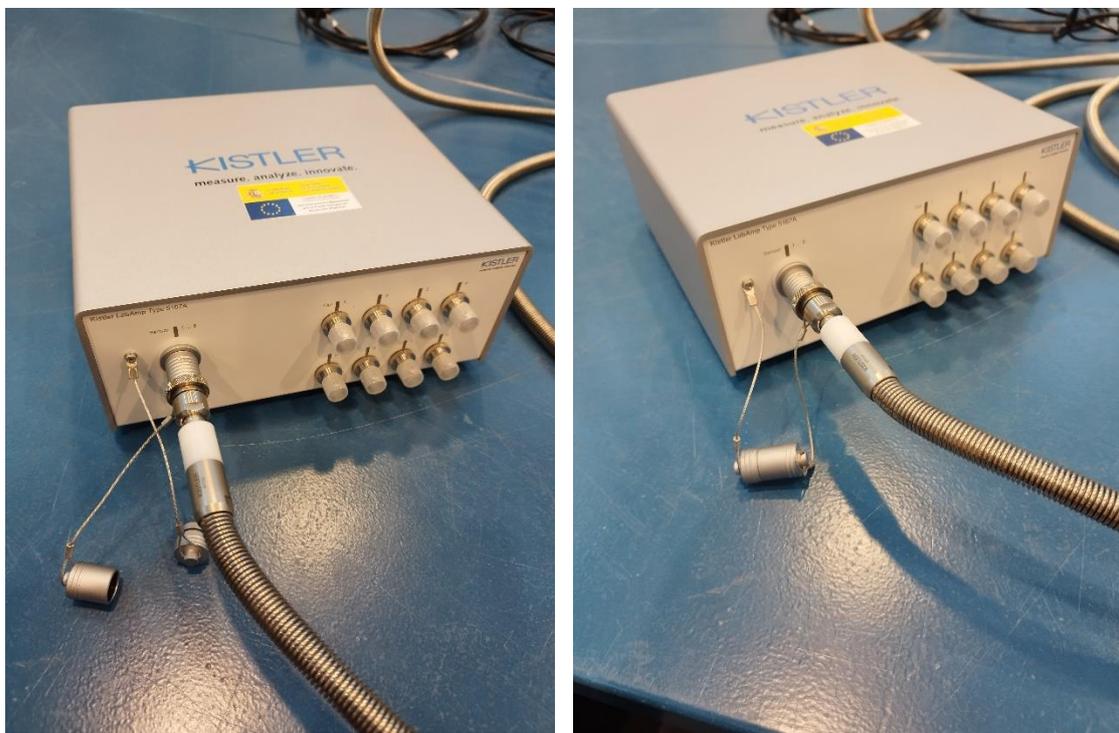


Figura 26. Conexión amplificador.

Por la otra parte del amplificador también se conecta tanto el cable de alimentación, directamente a la corriente, como el cable de red, conectado al ordenador (Figura 27).



Figura 27. Conexión cable de alimentación y de red.

Al ordenador también se ha de conectar un pen drive Kistler para poder usar el software DynoWare (Figura 28).



Figura 28. Conexión ordenador.

Tras ello sólo quedará fijar el dinamómetro al torno (Figura 29).

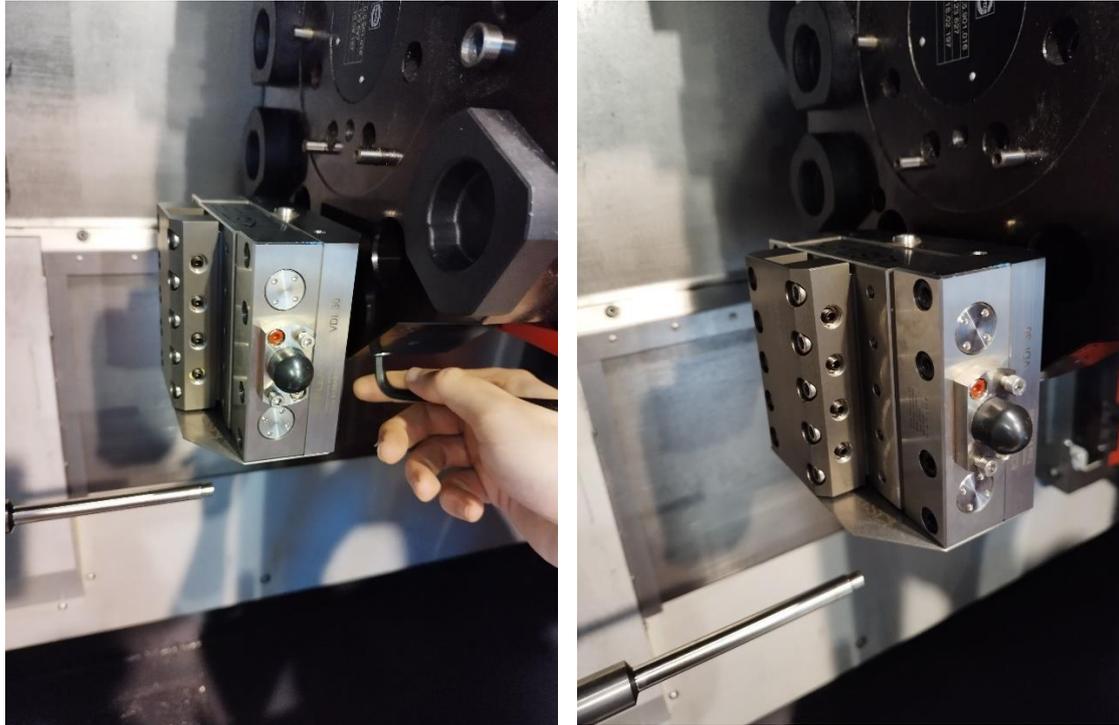


Figura 29. Dinamómetro fijado en el torno.

3.3. Monitorización del proceso

Una vez hecha la instalación del equipo el siguiente paso será configurar el programa DynoWare. El primer paso será abrir el software con el amplificador todavía apagado. Una vez abierto se ha de encender el amplificador con el interruptor que se aprecia en la Figura 30.

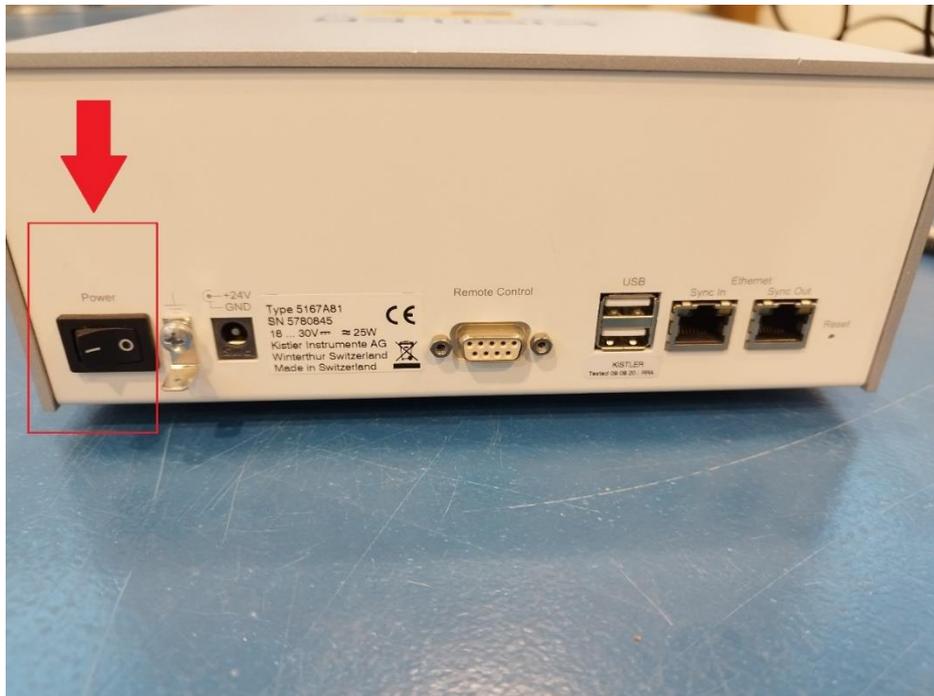


Figura 30. Interruptor amplificador.

Una vez hecho esto empezarán a parpadear unas luces de color amarillo en todos los canales en la parte posterior del amplificador. Cuando el amplificador esté listo para funcionar las luces cambiarán a color azul (Figura 31).



Figura 31. Luces amplificador.

Ahora solo faltaría configurar el software correctamente. Una vez abierto lo primero que se verá será la pantalla inicial (Figura 32). Primero se debe configurar el “Hardware”. Para ello se pulsa sobre la pestaña “Acquisition” y en el desplegable seleccionamos “Hardware” (Figura 33).

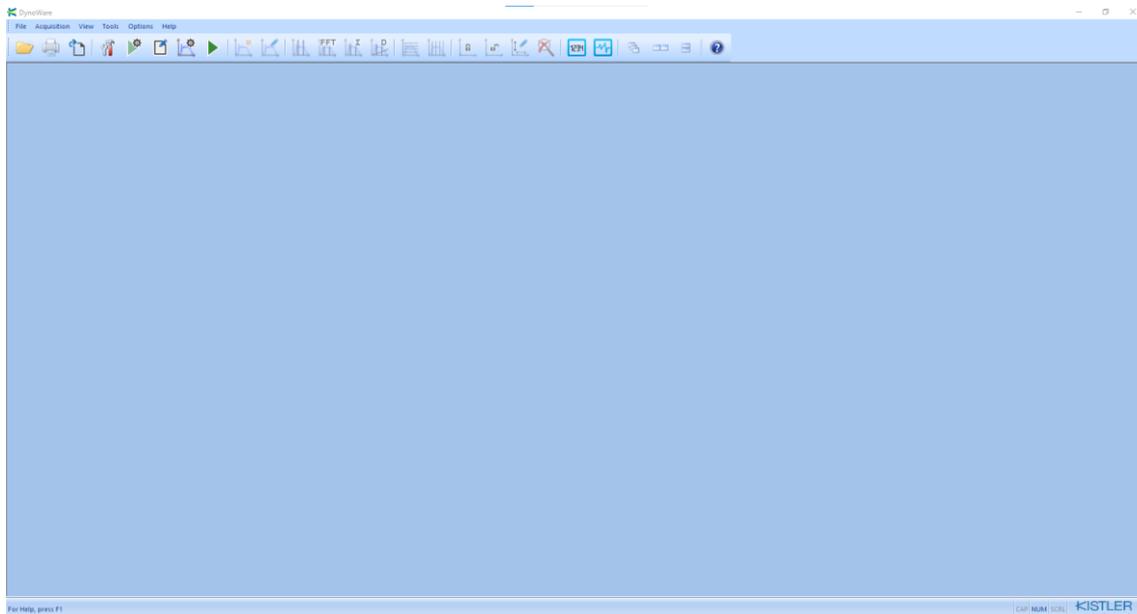


Figura 32. Pantalla principal.

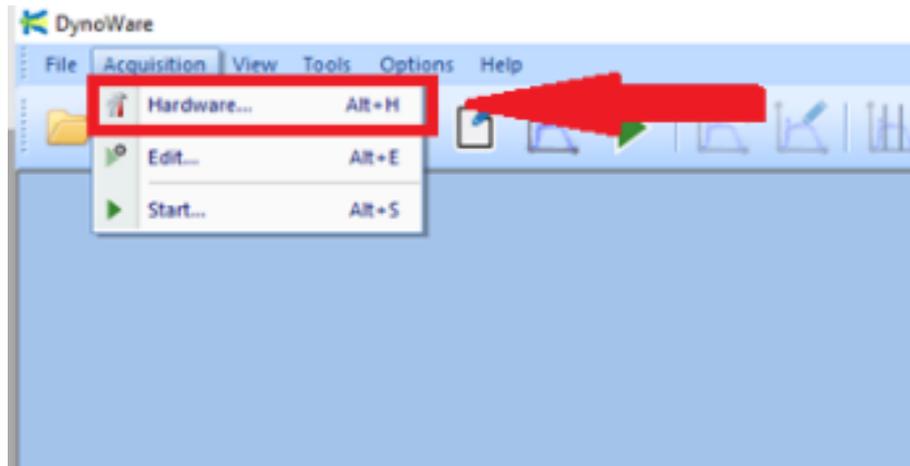


Figura 33. Desplegable Hardware

Una vez abierta la ventana, se empieza a configurar la pestaña “A/D Board” (Figura 34). Para ello se debe usar el programa “Setup Wizard” (Figura 36). Comprobamos que la dirección IP en Dynoware es la misma que la que señala el software. Si no fuera así, simplemente habría que clicar en “Add”, se abrirá una nueva ventana en la que habrá que pinchar en el botón “Find device”, y en la nueva ventana seleccionar la IP correcta. Si no sale ninguna IP en la ventana habrá que pinchar en “Refresh List”. Tras estos pasos clicamos en “OK” (Figura 35).

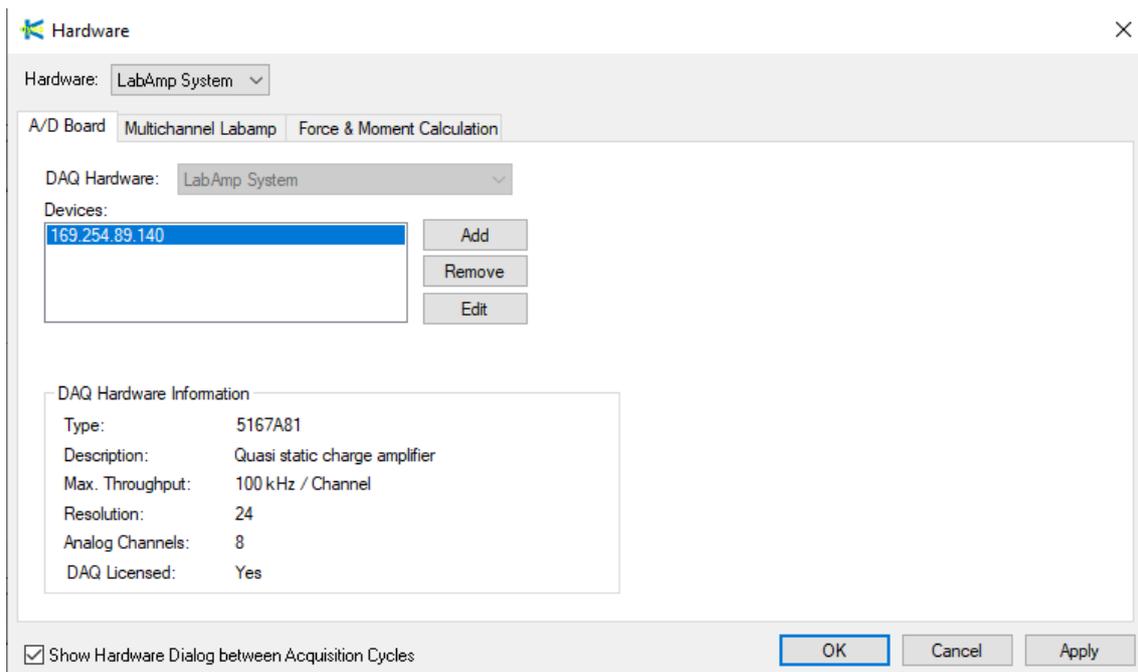


Figura 34. A/D Board.

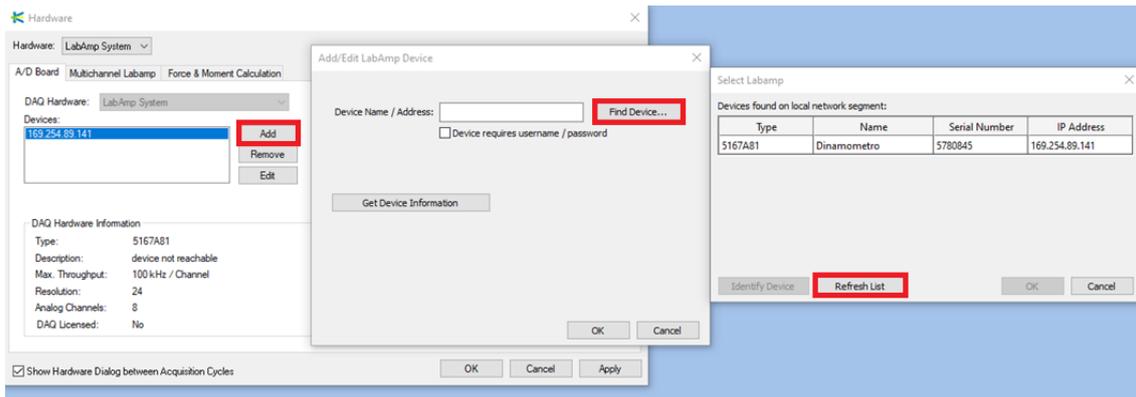


Figura 35. Pestaña Add/Edit LabAmp Device.

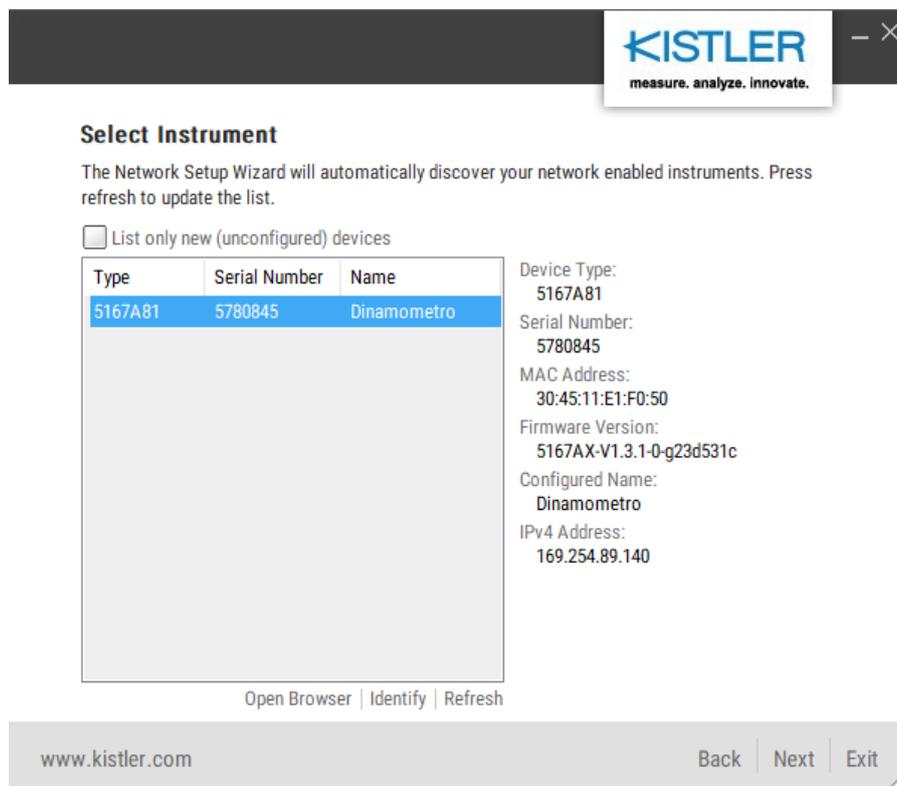


Figura 36. Setup Wizard.

Una vez configurada la primera pestaña, se pasa a configurar la pestaña “Multichannel Labamp” (Figura 37). Los apartados “Sensitivity”, y “Measuring Range” se rellenan con los datos indicados en el certificado de calibración (Figura 38). El orden de los canales es el dado por la ficha técnica del dinamómetro (Figura 39). Por último, dentro de esta pestaña hay que añadir un filtro en apartado “Filter”.

Hardware: LabAmp System

A/D Board: Multichannel Labamp Force & Moment Calculation

Channel	Label	Mode	Sensitivity	Unit	Measuring Range	Unit	Current	Filter	Time Constant
1	Fx12	Charge	-8,126	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long
2	Fx34	Charge	-8,126	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long
3	Fy14	Charge	-4,168	pC/N	8.000,00	N	-	3 kHz	Long
4	Fy23	Charge	-4,168	pC/N	8.000,00	N	-	3 kHz	Long
5	Fz1	Charge	-8,034	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long
6	Fz2	Charge	-8,034	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long
7	Fz3	Charge	-8,034	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long
8	Fz4	Charge	-8,034	pC/N	5.000,00	N	-	3 kHz	Long

Measure Mode: On Start Acquisition

Buttons: Measure, Reset, Read Parameters, Send Parameters

Show Hardware Dialog between Acquisition Cycles

Buttons: OK, Cancel, Apply

Figura 37. Pestaña Multichannel Labamp.

Messergebnisse Results of Measurement

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität ¹⁾ Linearity ¹⁾	Übersprechen Crosstalk			CMC ²⁾ CMC ²⁾
kN	pC/N	±%FSO	->Fx [%]	->Fy [%]	->Fz [%]	%
Fx 0 ... 10	-8,129	0,05		-0,5	1,2	0,11
Fx 0 ... 1	-8,116	0,07		-0,5	1,2	0,16
Fx 0 ... 0,1	-8,097	0,10		-0,4	1,2	0,14
Fy 0 ... 10	-4,158	0,12	0,6		0,6	0,13
Fy 0 ... 1	-4,147	0,14	0,6		0,5	0,28
Fy 0 ... 0,1	-4,141	0,18	0,6		0,5	0,17
Fz 0 ... 10	-8,075	0,03	-0,9	0,7		0,12
Fz 0 ... 1	-8,070	0,05	-0,9	0,6		0,28
Fz 0 ... 0,1	-8,070	0,12	-0,7	0,5		0,15

1) Linearität einschliesslich Hysterese
linearity including hysteresis

Figura 38. Recorte certificado de calibración.

Output ±10 V	
Ch1	F _{x1+2}
Ch2	F _{x3+4}
Ch3	F _{y1+4}
Ch4	F _{y2+3}
Ch5	F _{z1}
Ch6	F _{z2}
Ch7	F _{z3}
Ch8	F _{z4}

Figura 39. Orden canales [74].

Para acabar el apartado de “Hardware” solo quedaría rellenar la pestaña “Force & Moment Calculation” (Figura 40). En este apartado se seleccionan los canales que se quieran tener

disponibles tras la medición. Si se selecciona la opción “OFF”, sólo aparecerán los canales físicos, es decir, los canales medidos directamente por los sensores. Si se seleccionan otras opciones el programa calculará automáticamente fuerzas y momentos en los 3 ejes. Si se selecciona una opción diferente a “OFF” habrá que indicarle al programa las distancias a y b de los sensores. Dichas distancias a y b se pueden encontrar en la ficha técnica del dinamómetro (Figura 41). Una vez acabada la configuración de esta ventana se pulsa “OK” para validar los cambios.

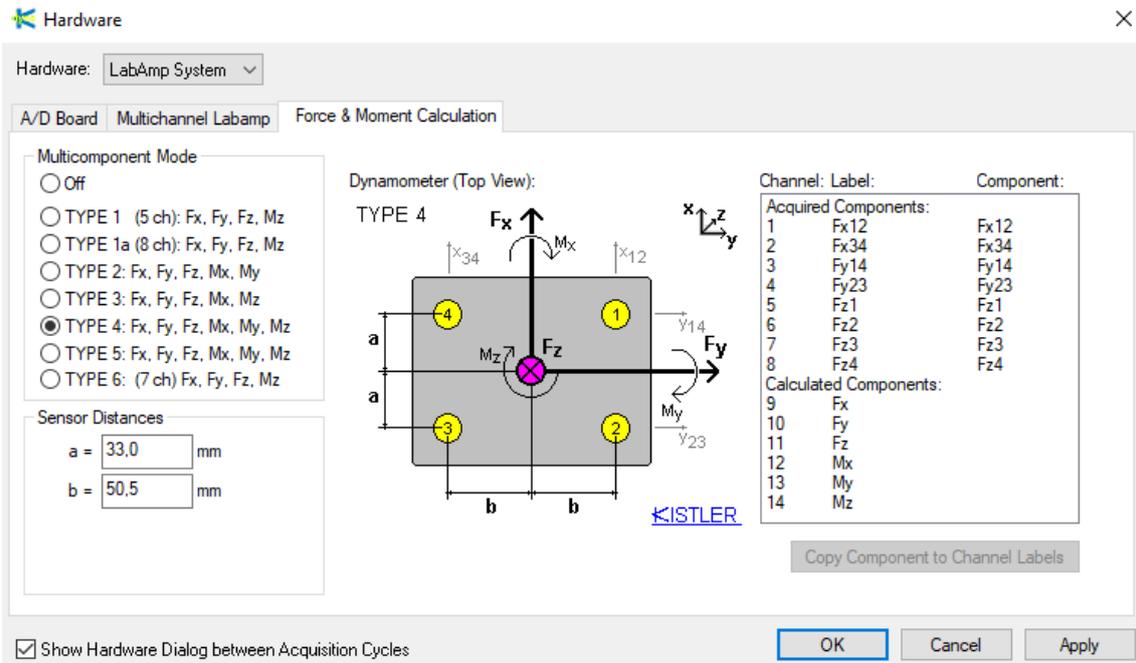


Figura 40. Pestaña Force & Moment Calculation.

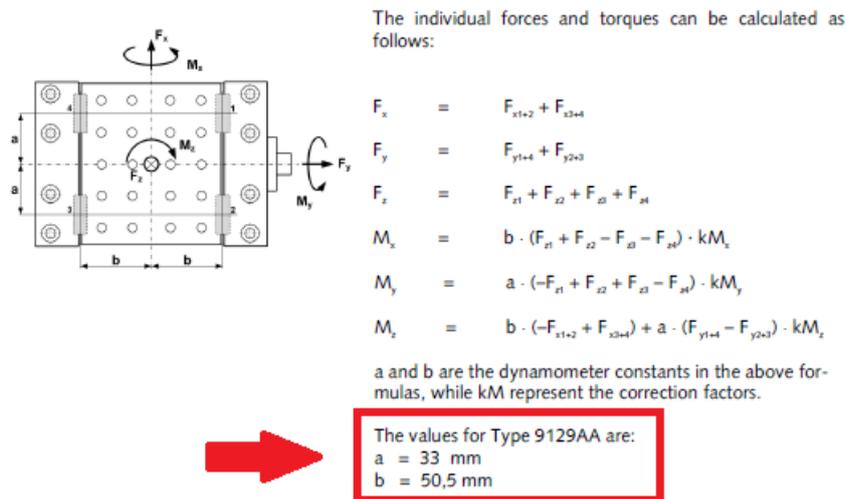


Figura 41. Recorte Ficha Técnica [74].

Una vez terminada la configuración del apartado anterior, se ha de configurar la ventana “edit”. Para ello se vuelve a pinchar sobre “Acquisition”, y posteriormente se clicca en “edit” (Figura 42). Como en el apartado anterior, se ha de configurar pestaña a pestaña. La primera pestaña que hay que configurar es “Parameters” (Figura 43). En esta pestaña se han de rellenar algunos parámetros como:

- Measuring time: Tiempo que durará la medición.

- Sample rate: Frecuencia de muestreo.
- Cycles: El número de ciclos que realizará.
- Trigger Delay Time: Tiempo de retraso.

Además de todo lo anterior, en este apartado también se seleccionará el nombre y el lugar donde se guardará el archivo.

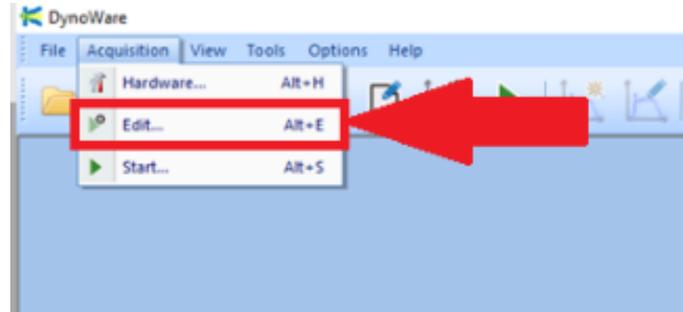


Figura 42. Desplegable "Edit".

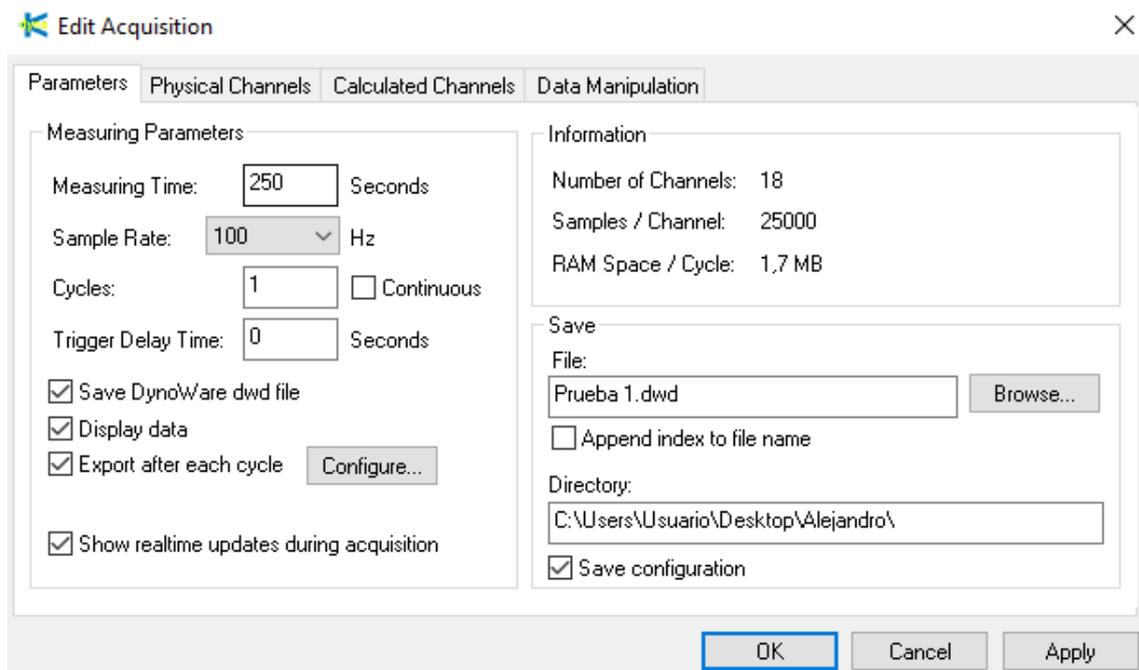


Figura 43. Pestaña "Parameters".

La siguiente pestaña es “Physical Channels” (Figura 44). En esta pestaña se seleccionan los canales en los que queremos realizar la medición. También se pueden seleccionar los canales en los que se quiera tener un retraso de medición.

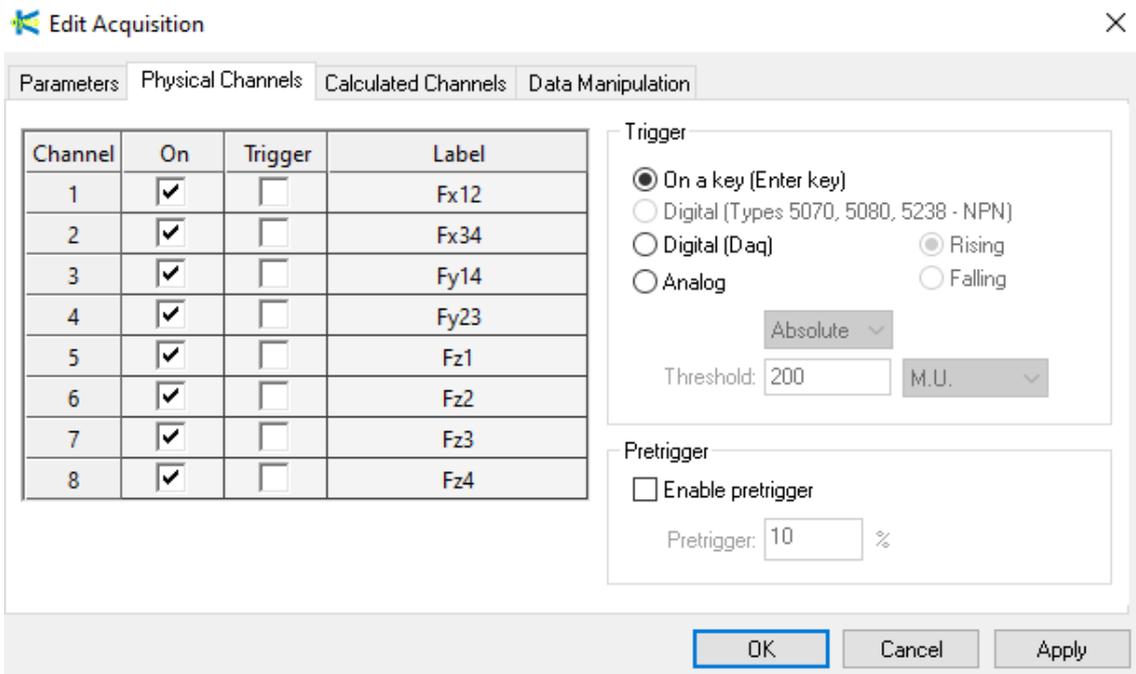


Figura 44. Pestaña "Physical Channels"

En la siguiente pestaña se pueden ver los canales calculados por el software, según se seleccionaron en el apartado anterior (Figura 45). Si se desean agregar canales adicionales con sus respectivos cálculos se puede hacer en la última pestaña de este bloque, "Data Manipulation" (Figura 46).

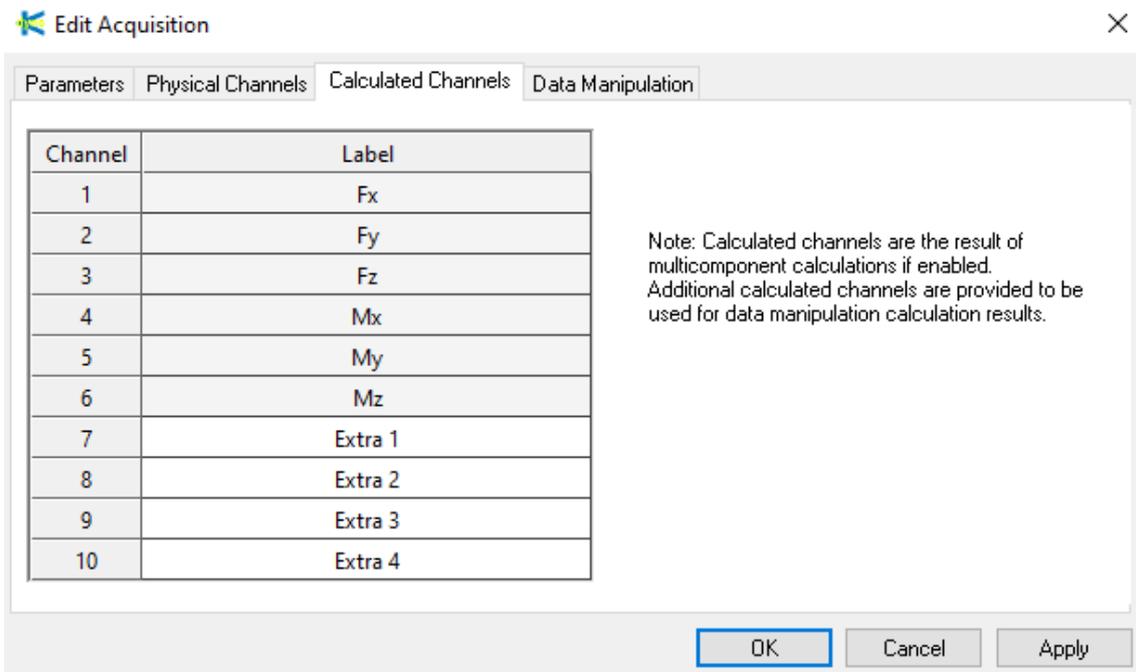


Figura 45. Pestaña "Calculated Channels".

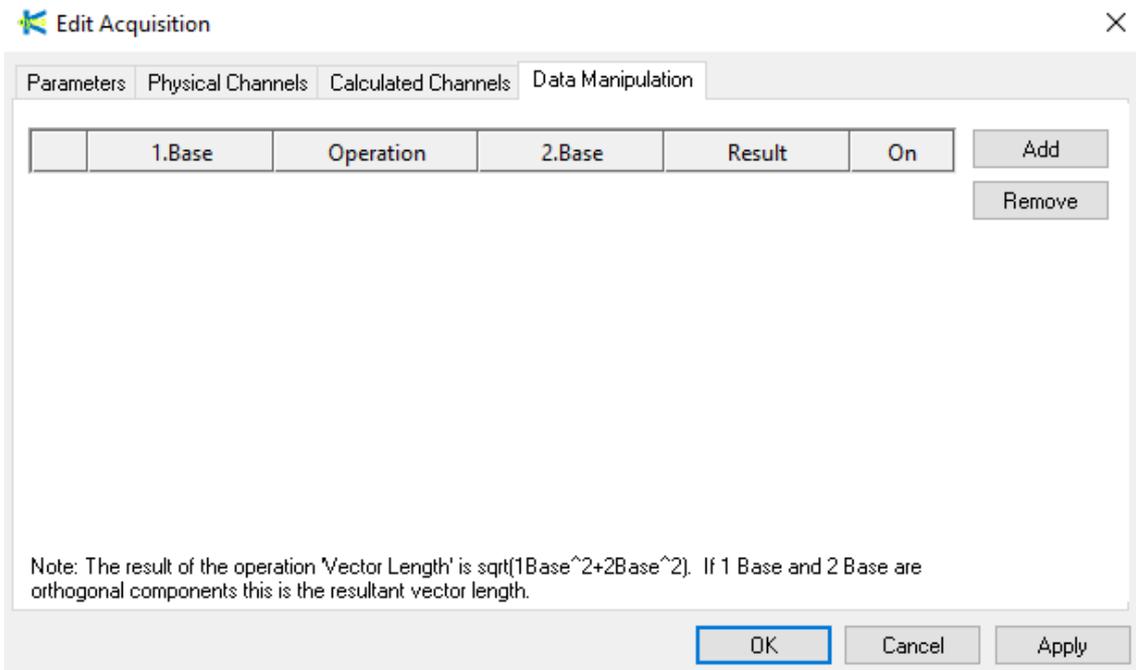


Figura 46. Pestaña "Data Manipulation".

Por último, para acabar con la configuración previa, pinchamos en el apartado “Documentation” (Figura 47). En la primera pestaña de esta ventana (Figura 48), se pueden añadir información adicional de la medición, como parámetros de corte, material a mecanizar, tipo de herramienta, título del documento, etc. En la segunda pestaña (Figura 49), aparece información adicional como la fecha y la hora del ensayo.

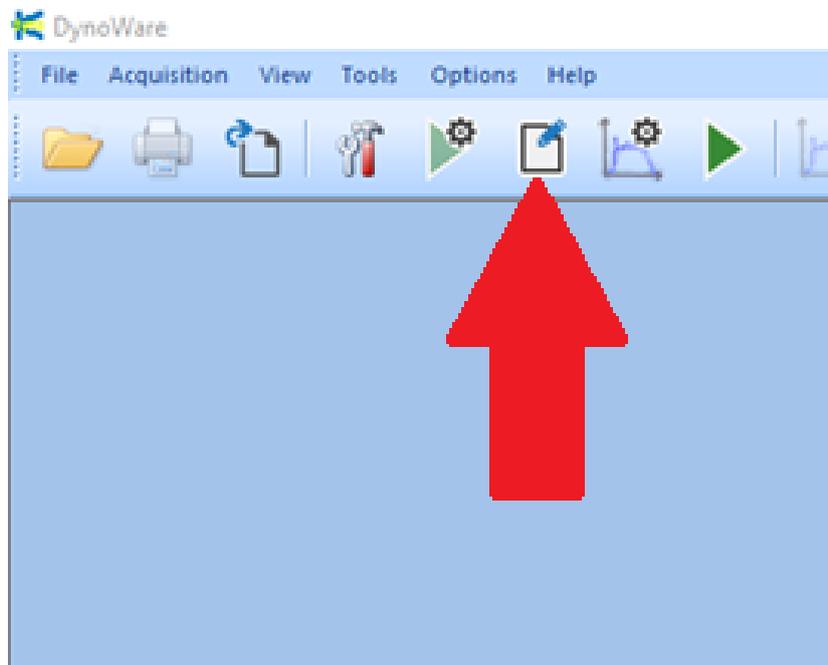


Figura 47. Botón “Documentation”.



Documentation

Comments File, Date, Time

Document title:
comp resul 200 02 1

Remarks:

Material:
Ti6Al4V

Tool:
T1

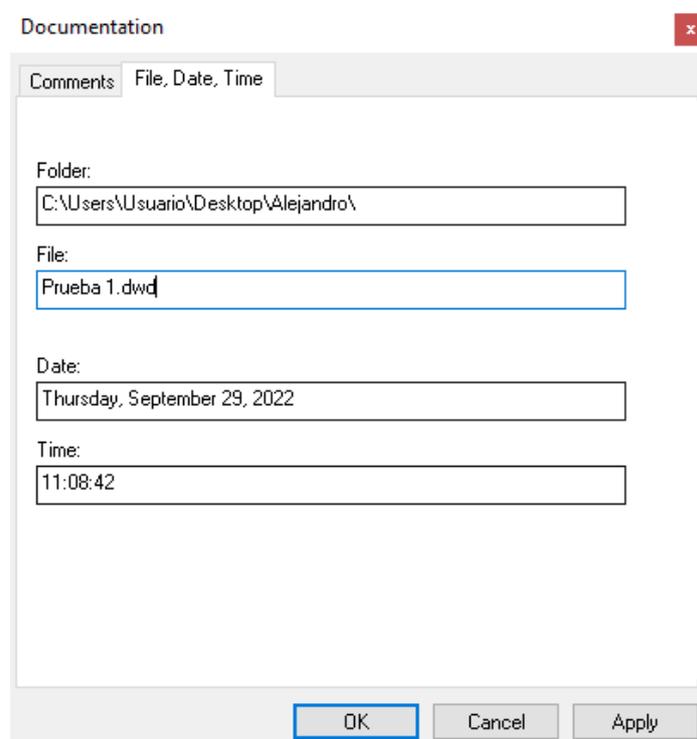
$V_c = 100$ m/min $f = 0.20$ mm/rev $a_p = 1$ mm
 $n =$ rpm $V_f =$ mm/min $a_e =$ mm

Metric units Imperial units

Cutting Force Documentation Mode
 Show Documentation Between Acquisition Cycles

OK Cancel Apply

Figura 48. Pestaña Comments.



Documentation

Comments File, Date, Time

Folder:
C:\Users\Usuario\Desktop\Alejandro\

File:
Prueba 1.dwd

Date:
Thursday, September 29, 2022

Time:
11:08:42

OK Cancel Apply

Figura 49. Pestaña File, Data, Time.

Además de todo lo anterior también se puede editar las gráficas que se verán una vez hecha la medición (Figura 51). Para ello hay que pinchar en el botón “Setup views” (Figura 50). No obstante, también se podrán elegir los tipos de gráfica una vez realizada la medición.

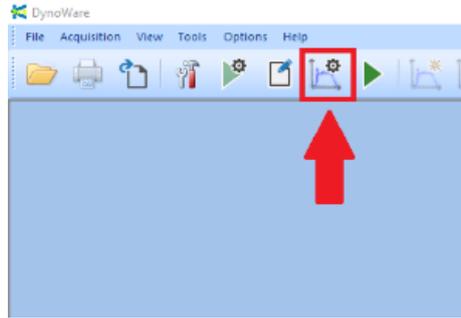


Figura 50. Botón "Setup views".

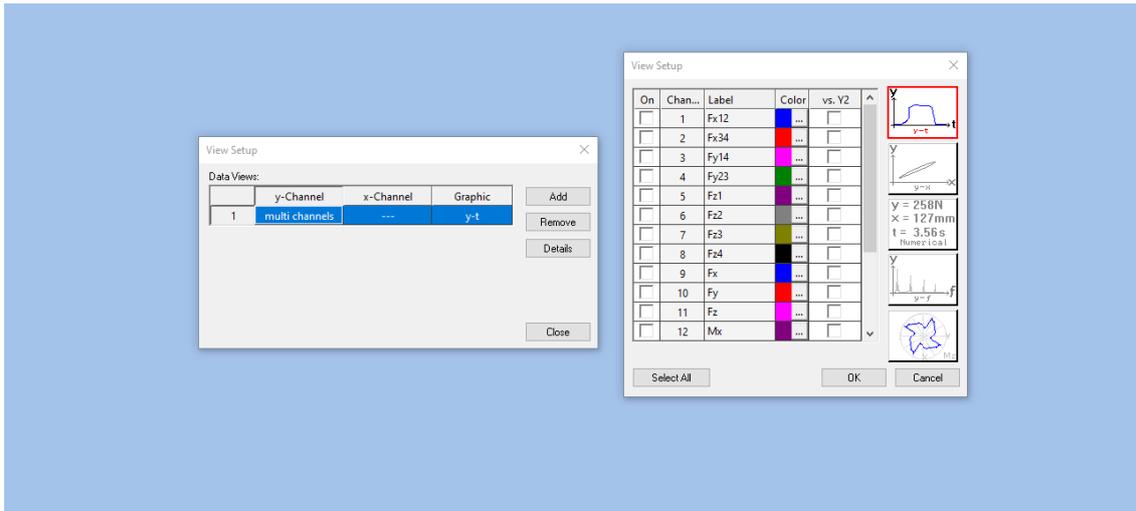


Figura 51. Ventana "View Setup".

Tras realizar los ajustes previos sólo quedaría empezar la medición pulsando el botón "Start" (Figura 52). Cuando se pulse dicho botón el software volverá a dar la opción de editar los parámetros configurados previamente. Si los parámetros son correctos se ha de pulsar el botón "OK". Tras ello aparecerá una ventana adicional con el botón "GO" para empezar la medición y el botón "STOP" para pararlo (Figura 53).

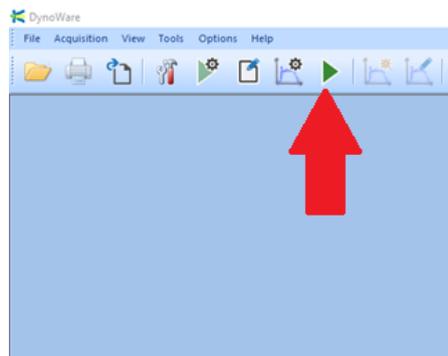


Figura 52. Botón Start".

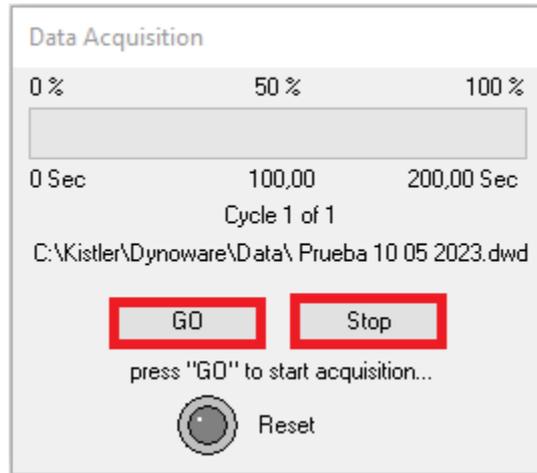


Figura 53. Botón "GO" y "STOP".

3.4. Interpretación de datos con el software

En este apartado analizaremos los datos obtenidos del software. Para abrir un archivo de medición guardado anteriormente hay que pinchar en "File", y en el desplegable seleccionar "Open" (Figura 54).

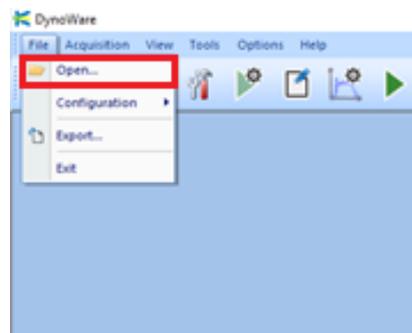


Figura 54. Botón "Open".

Una vez abierto el archivo se desbloquearán una serie de botones que dará acceso a diferentes tipos de gráficas (Figura 55). El primer botón, "new view" (Figura 56), creará una nueva ventana idéntica a la gráfica que esté abierta (Figura 57). El siguiente botón, "edit view" (Figura 58) permite editar la ventana seleccionada y elegir entre múltiples configuraciones. En la columna "On" se puede elegir los canales que se quieran ver representados en la gráfica. También se pueden elegir los colores de las líneas de los diversos canales y, por último, desde esta pestaña también se puede cambiar el tipo de gráfica (Figura 59).

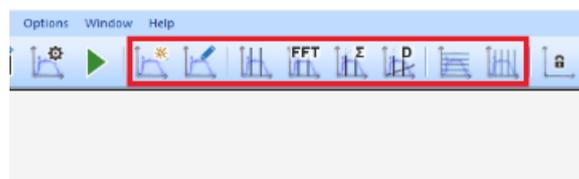


Figura 55. Botones estadísticas.

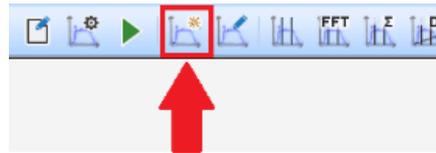


Figura 56. Botón "New view"

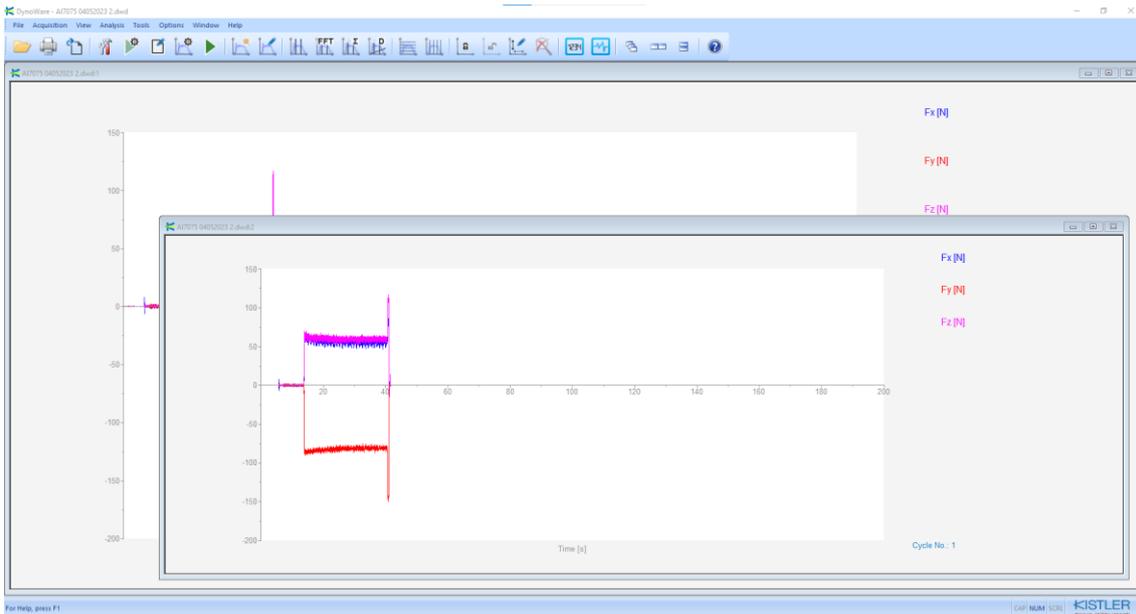


Figura 57. Ventana "New view"

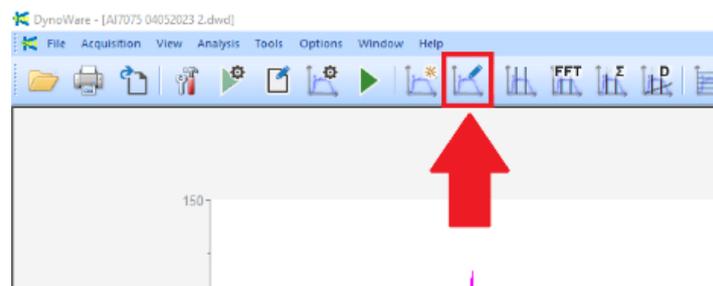


Figura 58. Botón "Edit View"

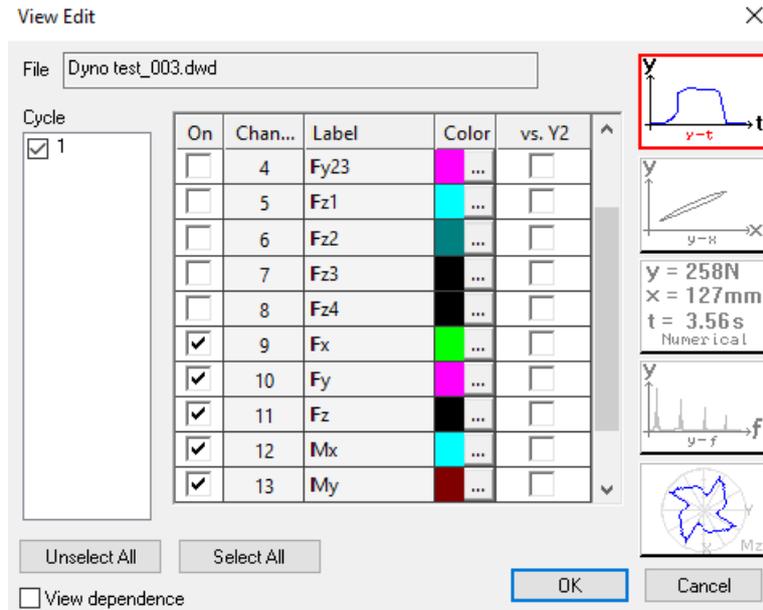


Figura 59. Ventana "Edit view".

El siguiente botón, "Cursor tool" (Figura 60), permite conocer valores como la fuerza de corte durante un tramo del ensayo delimitado por marcadores (Figura 61).

Con el botón "Partial FFT tool" (Figura 62) el programa mostrará una función FFT con el análisis de frecuencia entre los marcadores (Figura 63). También se puede pinchar en algún punto de la gráfica FFT y el Software te devuelve valores de frecuencia en ese punto. Para hacer zoom tanto en la gráfica FFT como en cualquier otra, simplemente habría que arrastrar el ratón manteniendo el click derecho pulsado, y para deshacer el zoom habría que pulsar doble click en el mismo botón (Figura 64). Si se quiere cambiar la escala de la función FFT habría que pulsar en "Options", y en el desplegable seleccionar "FFT scaling" (Figura 65). Puede ser interesante para el análisis de la función FFT tener el eje X en escala lineal y el eje Y en escala logarítmica (Figura 66).



Figura 60. Botón "Cursor Tool".

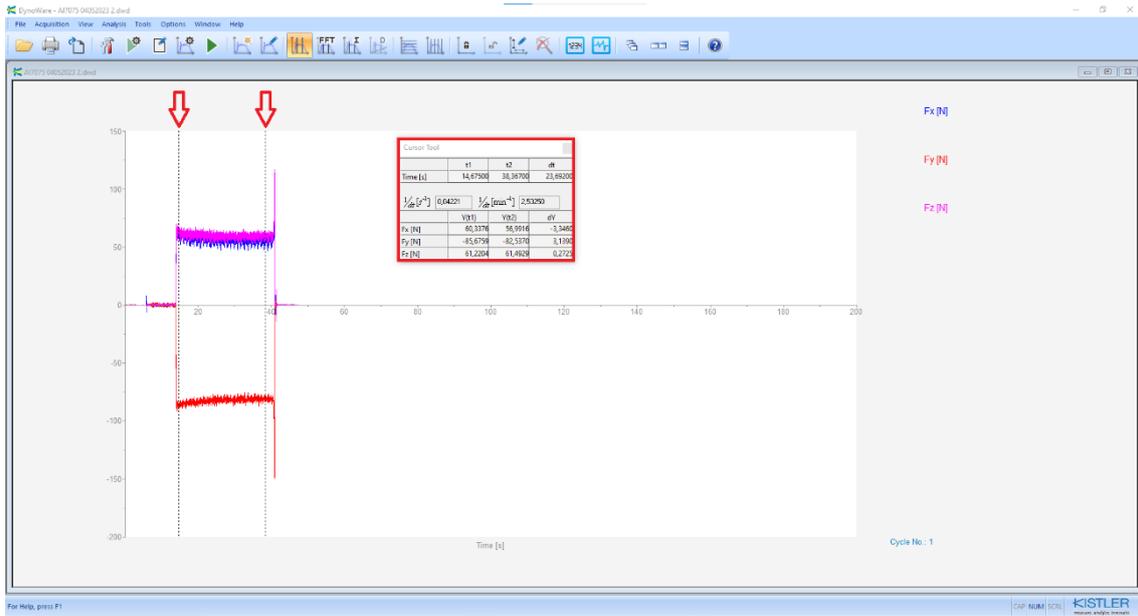


Figura 61. Ventana "Cursor Tool".

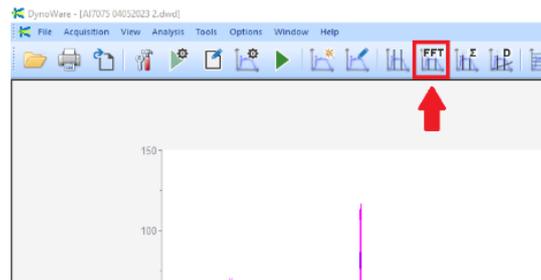


Figura 62. Botón "FFT".

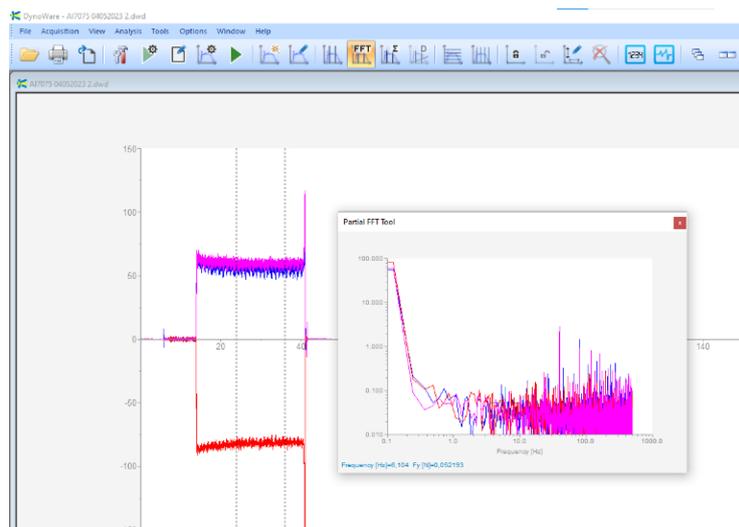


Figura 63. Ventana "FFT".

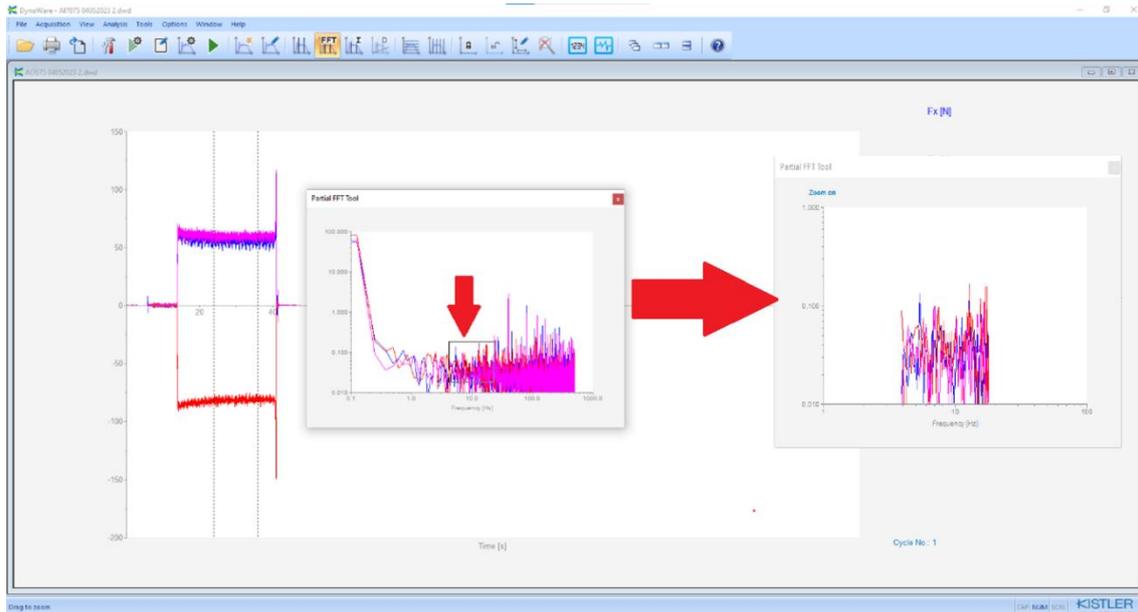


Figura 64. Zoom.

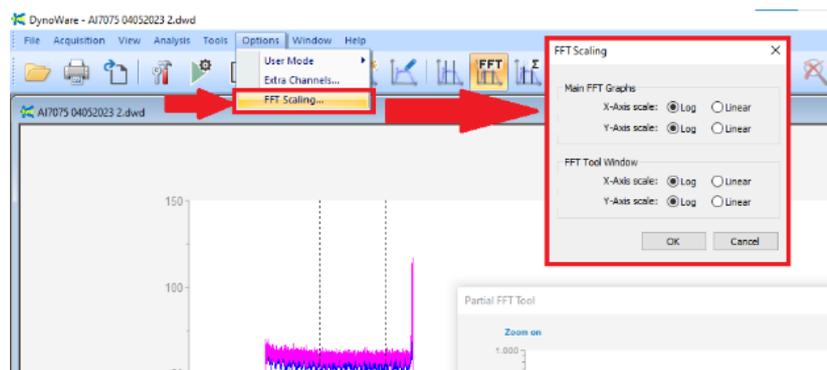


Figura 65. Ventana "FFT Scaling".

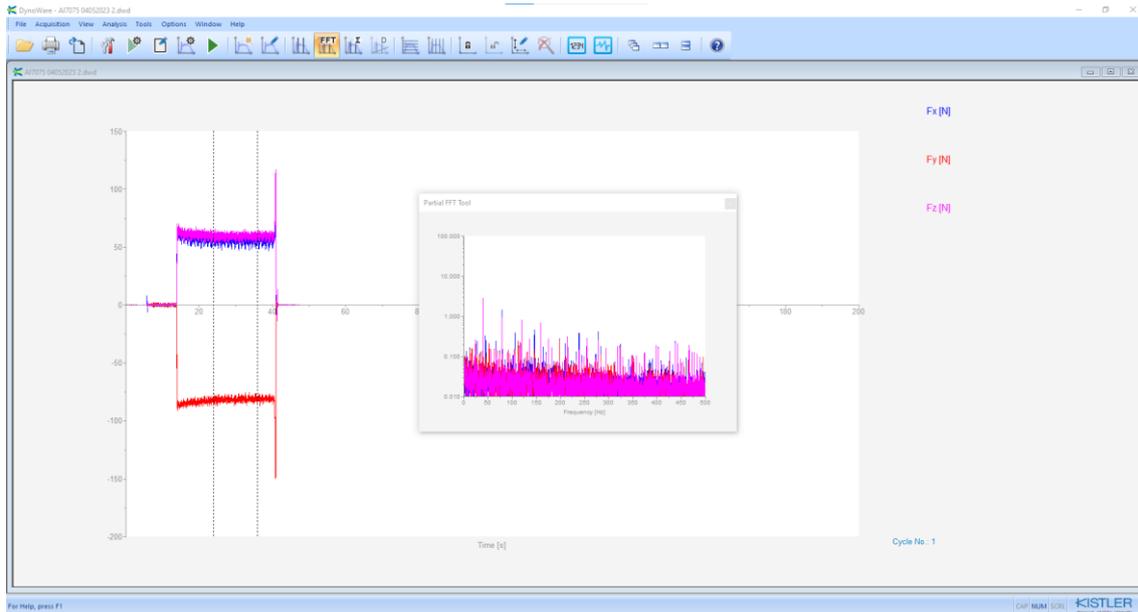


Figura 66. Función FFT Eje logarítmico.

El siguiente botón “Statistics” (Figura 67), es una función interesante del programa ya que aporta datos interesantes como el valor máximo, mínimo y medio dentro de un rango de valores delimitados por los cursores.

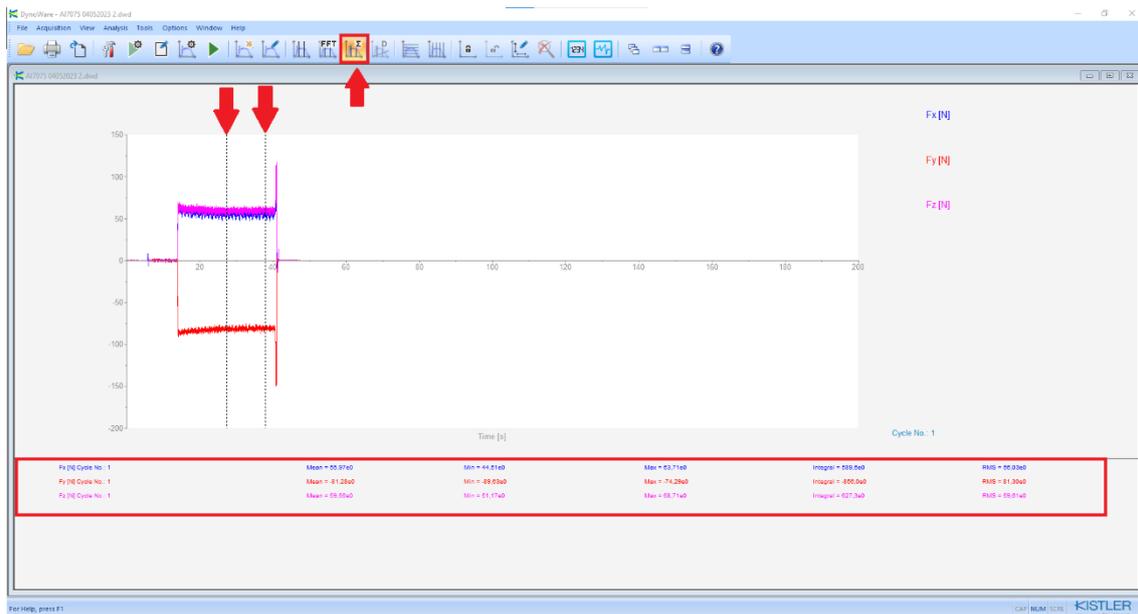


Figura 67. Ventana "Statistics".

Los botones “Horizontal grid” y “Vertical grid” (Figura 68) generan cuadrículas horizontales y verticales respectivamente que son de gran utilidad si se quieren analizar las gráficas a simple vista (Figura 69).

Los botones “Lock Scaling” y “Unlock Scaling” sirven para bloquear y desbloquear la escala del eje X e Y (Figura 70). El siguiente botón “Manual Scaling”, permite modificar la escala del eje X e Y manualmente (Figura 71).

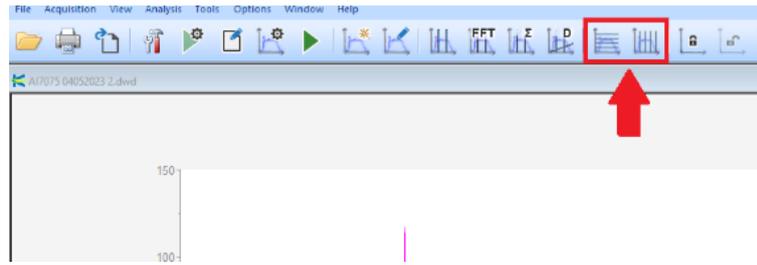


Figura 68. Botones "Horizontal grid" y "Vertical grid".

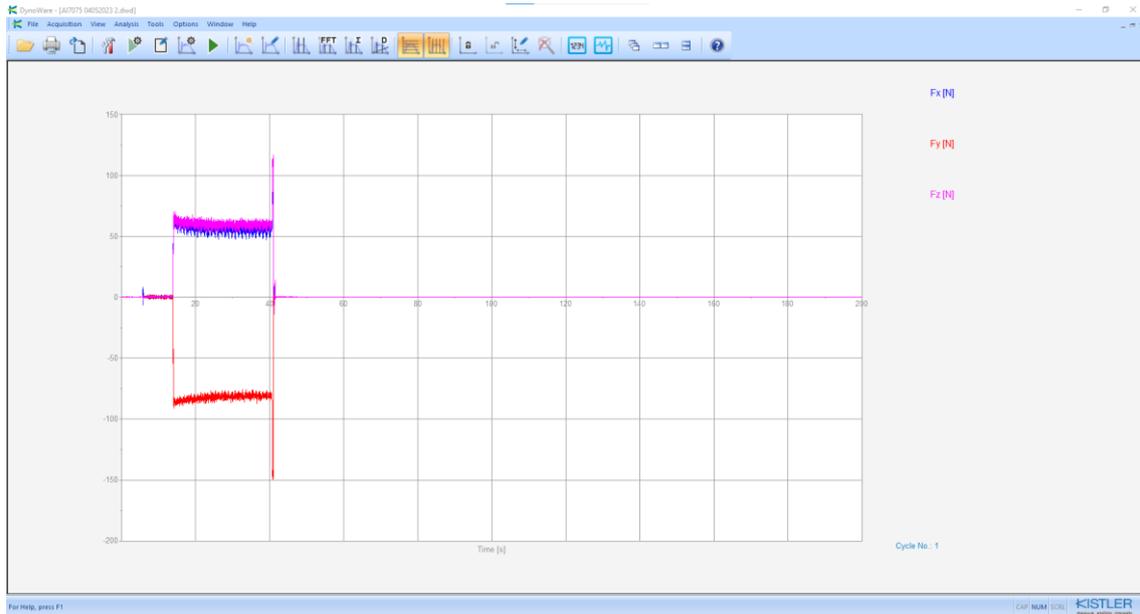


Figura 69. Ventana "Horizontal grid" y "Vertical grid".

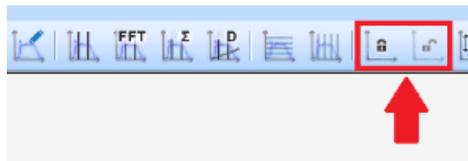


Figura 70. Botones "Lock Scaling" y "Unlock Scaling".

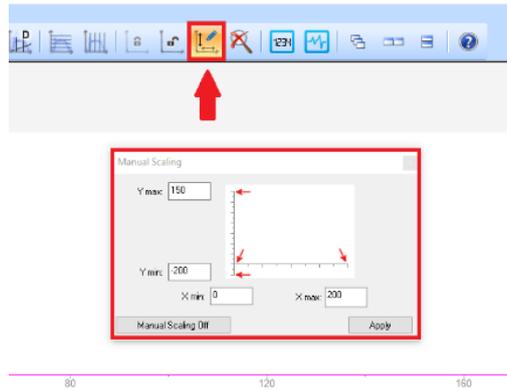


Figura 71. Botón " Manual Scaling ".

Por último, otra función de interés que tiene Dynoware es la opción de aplicar un filtro. Para ello se pulsa sobre “Analysis”, y dentro del desplegable seleccionar la opción “Filtering On” (Figura 72). Se abrirá un desplegable y permitirá, en los canales elegidos, aplicar diferentes tipos de filtros, eligiendo las frecuencias y el orden (Figura 73).

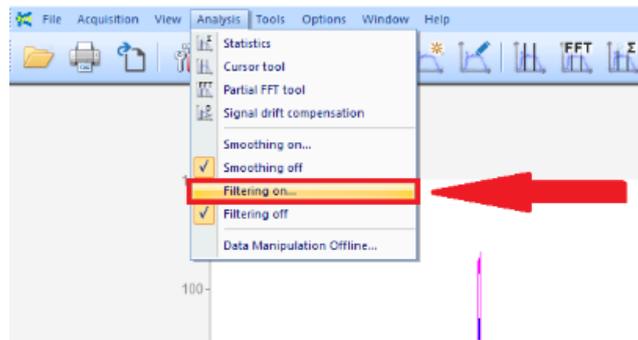


Figura 72. Botón "Filtering".

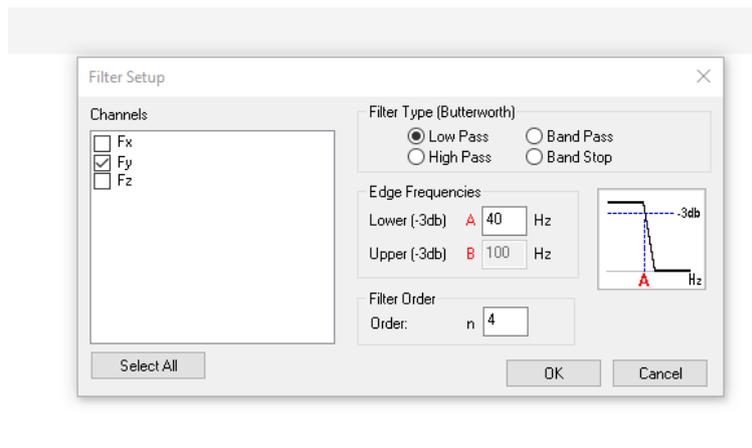


Figura 73. Ventana "Filtering".

3.5. Guía rápida de uso

En este apartado se ha hecho una guía rápida de instalación del dinamómetro piezoeléctrico en un proceso de torneado usando el software Dynoware.

La instalación del equipo se hace en 2 fases. Primeramente, la instalación del equipo en sí, que consta del amplificador o “Labamp”, del dinamómetro piezoeléctrico, del cable de red, del cable de alimentación y del cable de alta tensión. Una vez instalado el equipo, habría que configurar el software previo a realizar la medición. En la Figura 74, se ha realizado un esquema de la guía rápida de instalación con un diagrama de flujo. En el apartado 3.2 y 3.3 se detalla con más profundidad este proceso.

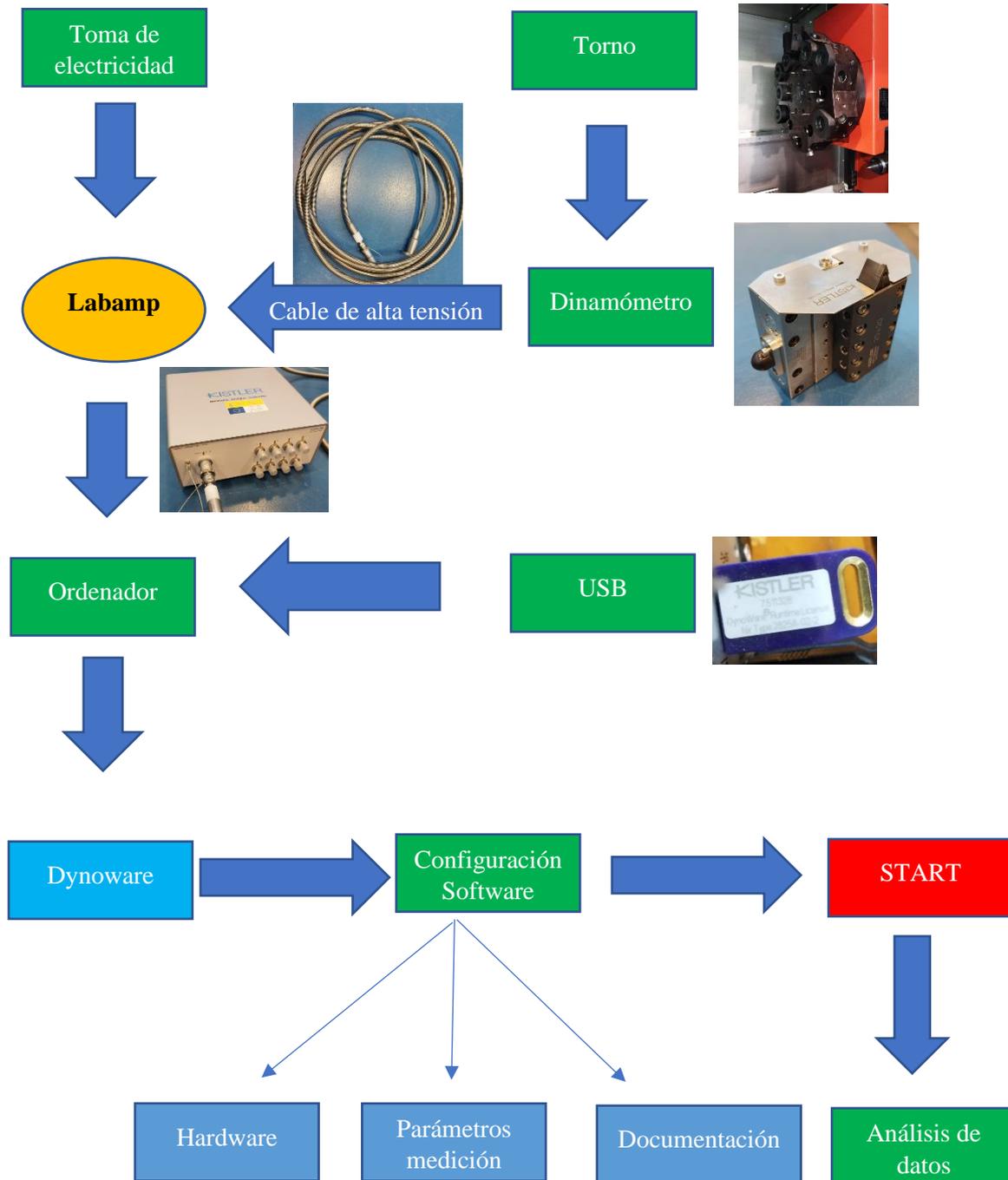


Figura 74. Diagrama de flujo guía rápida de puesta a punto.

CAPÍTULO 4. Análisis de resultados

4.1. Primeras comprobaciones

Antes de realizar un análisis de resultados se ha hecho una validación del correcto funcionamiento del dinamómetro. Para ello se han realizado varios ensayos con materiales y parámetros de corte diferentes y se han comparado con la literatura para comprobar que los valores medidos son correctos. Los materiales y parámetros usados para esta validación son los reflejados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen materiales validación.

Material	Aleación de titanio	Aleación de aluminio
Velocidad de corte (v_c) [m/min]	50	240
Velocidad de avance (f) [mm/rev]	0.1	0.05
Profundidad de corte (a_p) [mm]	1	1

Para todos los ensayos se ha usado como herramienta de corte la referencia DCMT11T308-F2 TP2500, de SECO (Figura 75). Sus dimensiones son las reflejadas en la Figura 76. El portaherramientas utilizado, de referencia SDNCN 2020 K11, se puede ver en la Figura 77.



Figura 75. Herramienta de corte.

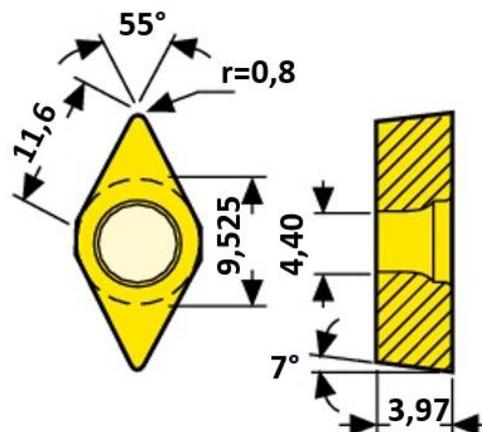


Figura 76. Dimensiones herramienta de corte.



Figura 77. Portaherramientas.

Primero se ha hecho un mecanizado con una aleación de titanio. La composición química es la reflejada en la Tabla 5. Se trata de una aleación de Ti6Al4V. Se realizó un torneado con los siguientes parámetros de corte:

- Velocidad de corte (v_c): 50 m/min.
- Velocidad de avance (f): 0.1 mm/rev.
- Profundidad de corte (a_p): 1 mm.

Tabla 5. Composición química Ti6Al4V.

Ti	Al	V	Fe	C	O
89.9%	5.8%	4%	<0.25%	<0.3%	<0.2%

Con estos datos se han obtenido los resultados de la Figura 78, siendo la fuerza en el eje Y la fuerza más significativa, como se ha explicado en los puntos anteriores. Usando la función “Statistics” de Dynoware, se puede ver la fuerza de corte media, que da en torno a los 214 N. Comparándolos con los datos de [77, 78], se puede comprobar que los valores son similares. En la Figura 79, se puede ver una gráfica de la fuerza de corte en función de la velocidad de corte para $f=0.1$ mm/rev realizado con el método de elementos finitos. Se puede comprobar que en el análisis que realizó Kurma et al, la fuerza de corte con los mismos parámetros usados en este trabajo es en torno a los 230 N, un valor muy similar al que ha medido el dinamómetro.

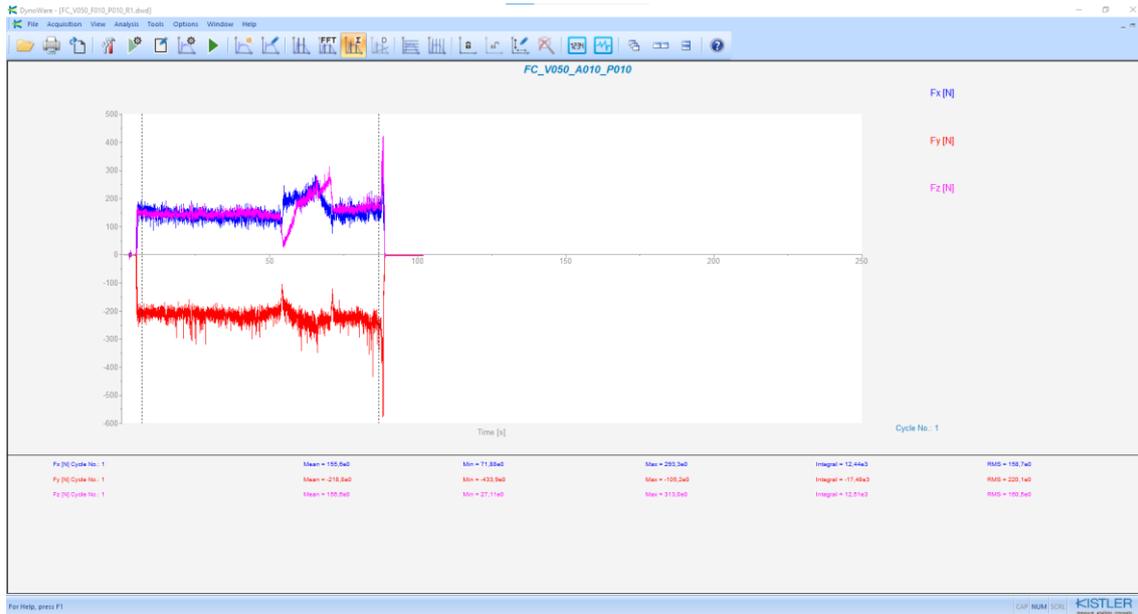


Figura 78. Ensayo Titanio.

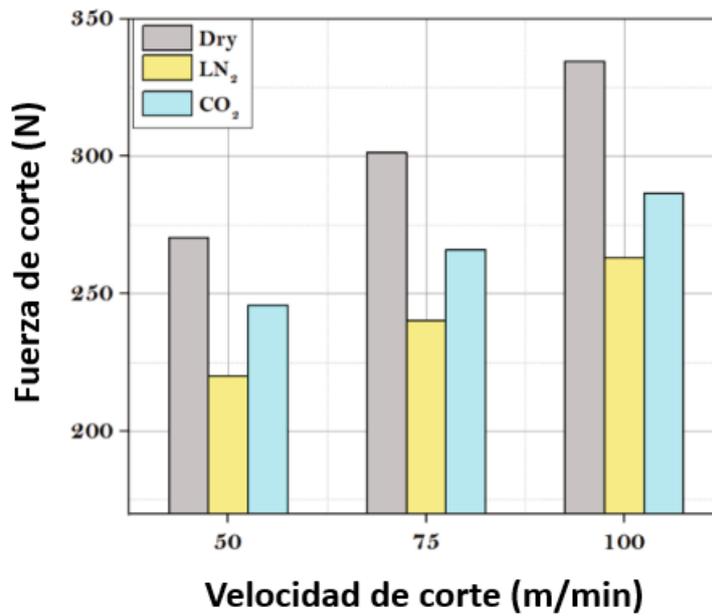


Figura 79. Fuerza de corte en función de la velocidad para $f=0.1\text{mm/rev}$. Adaptado de [76].

Para una segunda comprobación se hizo un ensayo con AISI 1050. Se realizó un torneado con los siguientes parámetros de corte:

- Velocidad de corte (v_c): 240 m/min.
- Velocidad de avance (f): 0.05 mm/rev.
- Profundidad de corte (a_p): 1 mm.

La composición química de este material es la mostrada en la Tabla 6.

Tabla 6. composición química AISI 1045.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
0.45%	0.6%	0.4%	0.04%	0.0045%	0.2%	0.08%	0.3%

Los datos obtenidos son los reflejados en la Figura 80. Volviendo a calcular su valor medio está en torno a los 200 N. En la literatura, Rao et al en [77], y Cakir et al en [78], hacen un análisis de las fuerzas de corte con este material. En la Figura 81 se puede ver una tabla que refleja la fuerza de corte en función del recubrimiento de la herramienta con unos parámetros de corte similares a los usados en este trabajo. Se puede apreciar que la fuerza de corte está en torno a los 200 N, un valor similar al que mide el dinamómetro.

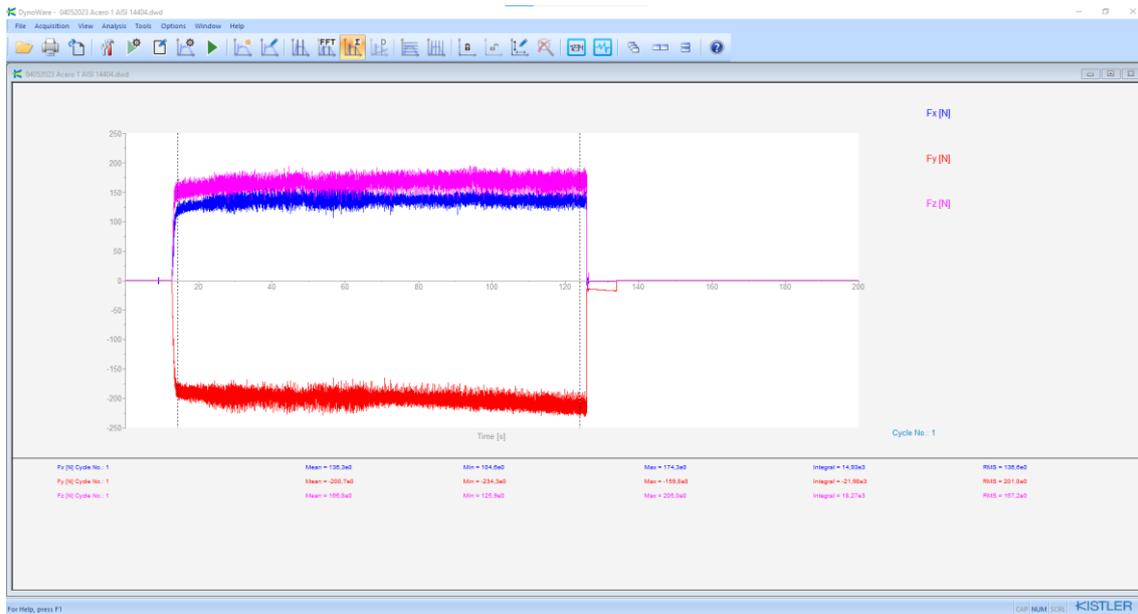


Figura 80. Ensayo AISI 1050.

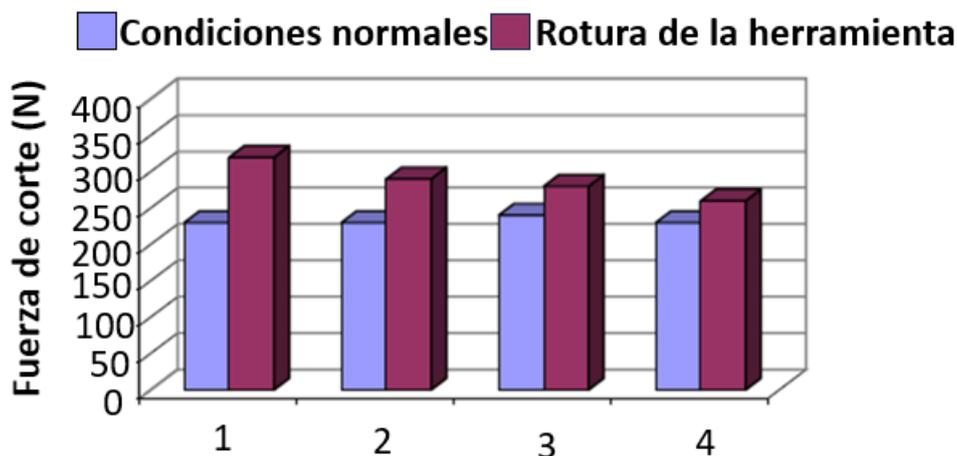


Figura 81. Fuerzas de corte en función del recubrimiento de la herramienta de corte. 1-Sin recubrimiento; 2-TiC + TiCN + TiN; 3-TiC+ Al2O3 + TiN; 4-TiAlN. Adaptado de [78].

4.2. Análisis fuerzas de corte

En este apartado se analizarán las fuerzas de corte con distintos materiales y parámetros de corte. En la Tabla 7 se resumen los ensayos realizados.

Tabla 7. Resumen ensayos.

Ensayo	Material	Velocidad de corte (v_c) [m/min]	Velocidad de avance (f) [mm/rev]	Profundidad de corte (a_p) [mm]
1	UNS A97075.	120	0.05	1
2	UNS A97075.	120	0.05	1
3	UNS A97075.	120	0.05	1
4	AISI 14404	120	0.05	1
5	AISI 14404	120	0.05	1
6	AISI 14404	240	0.05	1
7	AISI 14404	240	0.05	1
8	AISI 1045	120	0.05	1
9	AISI 1045	120	0.1	1
10	AISI 1045	240	0.1	1

4.2.1. Análisis fuerzas de corte en mecanizado de Aluminio UNS A97075.

Para el análisis de las fuerzas de corte en aluminio se han realizado 3 ensayos con los siguientes parámetros de corte.

- Velocidad de corte: 120 m/min.
- Velocidad de avance: 0.05 mm/rev.
- Profundidad de corte: 1 mm.

La composición química de esta aleación de aluminio es la mostrada en la Tabla 8.

Tabla 8. Composición química Aluminio UNS A97075.

Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Mn	Al
6.03%	2.62%	1.87%	0.19%	0.09%	0.07%	Resto

En el primer ensayo se usó una probeta de diámetro 20 mm (Figura 82). En los dos siguientes ensayos se usó la misma probeta con diámetro 18 (Figura 83) y 16 (Figura 84) respectivamente.

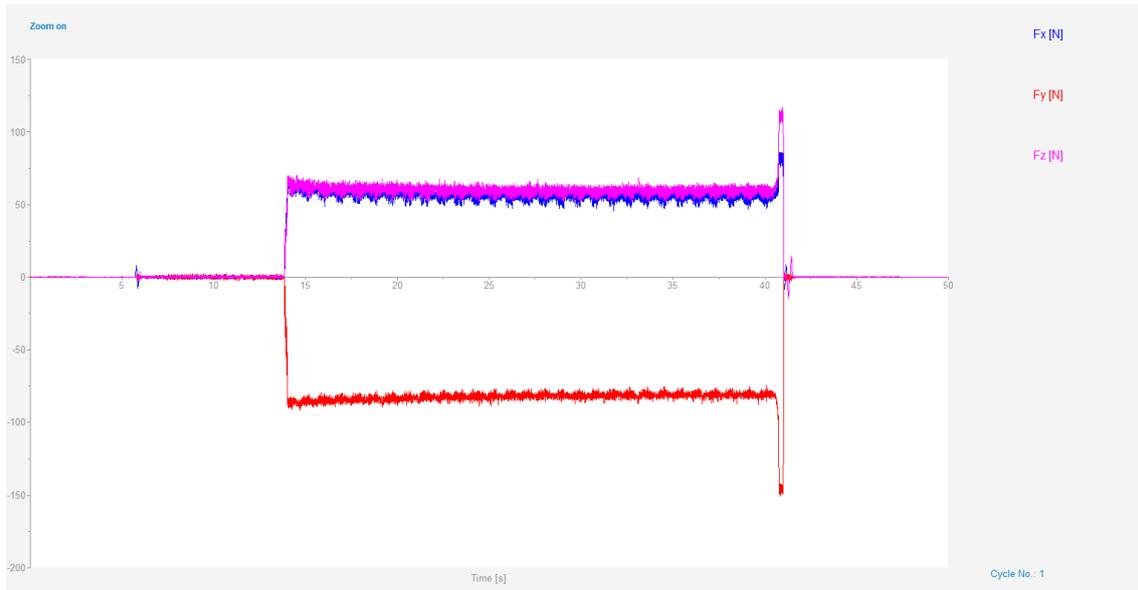


Figura 82. Ensayo aluminio diámetro=20 mm.

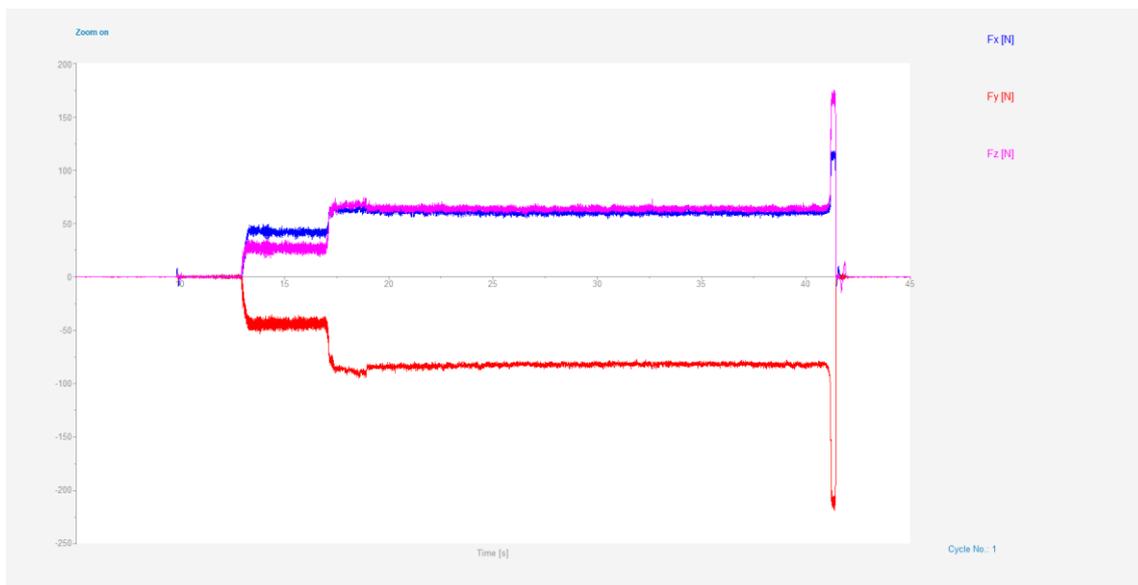


Figura 83. Ensayo aluminio diámetro=18 mm.

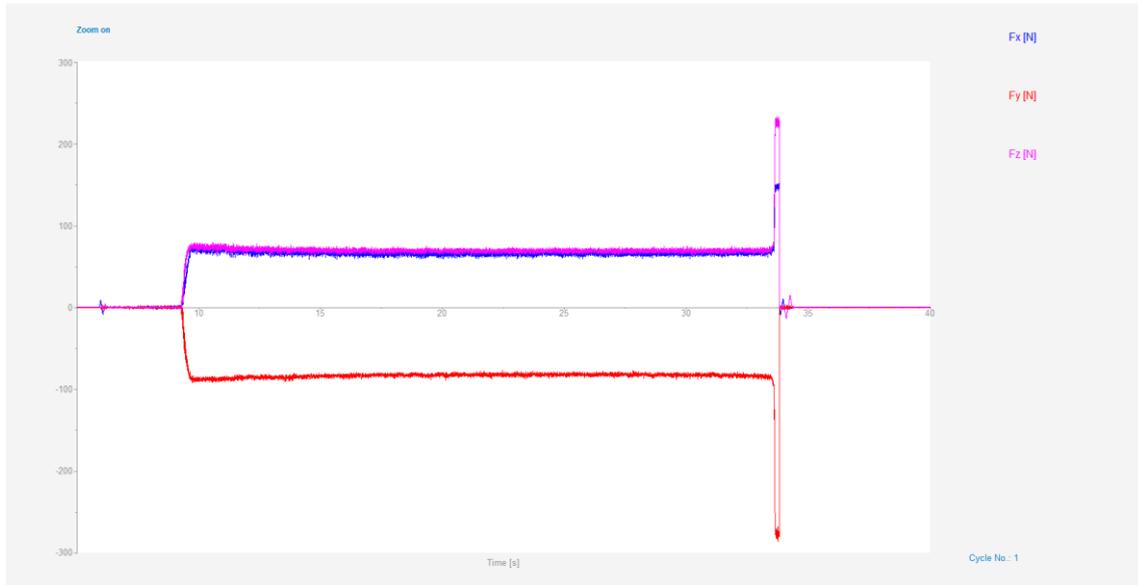


Figura 84. Ensayo aluminio diámetro=16 mm.

Analizando los 3 ensayos se puede comprobar el correcto funcionamiento del dinamómetro, ya que el diámetro de la pieza ensayada no afecta a las fuerzas de corte. En la Figura 85 se ha hecho una comparativa de los 3 ensayos con sus estadísticas medias y los valores obtenidos son muy similares, en torno a las 82 N de fuerza de corte media. En [79] Malie et al, realizan un estudio sobre las fuerzas de corte durante un proceso de torneado de aluminio 7075. En la Figura 86 estos investigadores representaron las fuerzas de corte, tanto experimentales como teóricas, en función de diferentes parámetros de corte para Al7075. Usando esta figura se puede comprobar que en la línea 4, se usan unos parámetros de corte muy similares a los que se han usado en este ensayo obteniendo una fuerza de corte de 73 N medido de manera experimental, un valor muy parecido al que mide el dinamómetro en el presente punto del proyecto.

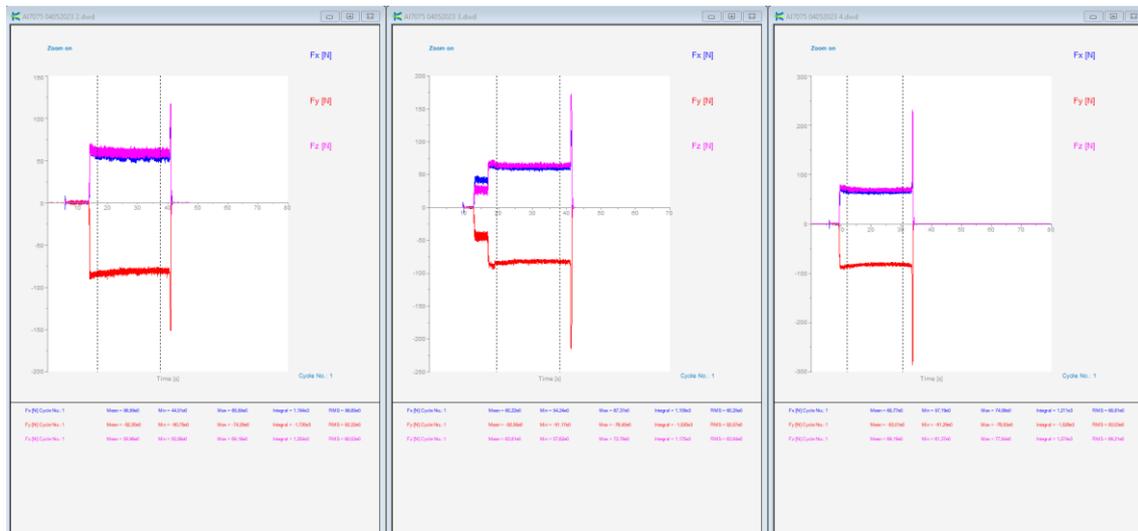


Figura 85. Comparativa ensayos aluminio.

Expt. No.	Process Parameters			Experimental Results		Simulation Results		% Relative Error	
	Speed	Feed	D.O.C.	F_c (N)	F_r (N)	F_c (N)	F_r (N)	F_c (N)	F_r (N)
1	1500	0.1	1.841	153	66	128	58	19.53	13.79
2	1500	0.1	1	92	46	79	40	16.46	15.00
3	2000	0.15	0.5	55	32	47	28	17.02	14.29
4	2000	0.05	1.5	74	41	64	36	15.63	13.89
5	2340.9	0.1	1	73	51	63	45	15.87	13.33
6	1000	0.15	0.5	48	34	42	30	14.29	13.33
7	1000	0.15	1.5	173	84	143	74	20.98	13.51
8	659.1	0.1	1	103	62	88	55	17.05	12.73
9	1000	0.05	0.5	47	38	41	33	14.63	15.15
10	1000	0.05	1.5	95	50	82	44	15.85	13.64
11	1500	0.1841	1	130	70	111	61	17.12	14.75
12	1500	0.1	0.1591	32	15	28	13	14.29	15.38
13	2000	0.15	1.5	180	75	151	65	19.21	15.38
14	1500	0.0159	1	45	27	39	24	15.38	12.50
15	2000	0.05	0.5	40	25	35	22	14.29	13.64
16	1500	0.1	1	100	55	84	50	19.05	10.00
17	1500	0.1	1	90	60	79	52	13.92	15.38
18	1500	0.1	1	96	62	82	55	17.07	12.73
19	1500	0.1	1	95	58	82	51	15.85	13.73
20	1500	0.1	1	95	58	83	51	14.46	13.73

Figura 86. Fuerza de corte en función de diferentes parámetros de corte [79].

En la Figura 87 se ha realizado una gráfica resumen de los 3 ensayos, donde se puede apreciar como la fuerza de corte (F_y), se mantiene prácticamente constante a velocidad de corte constante.

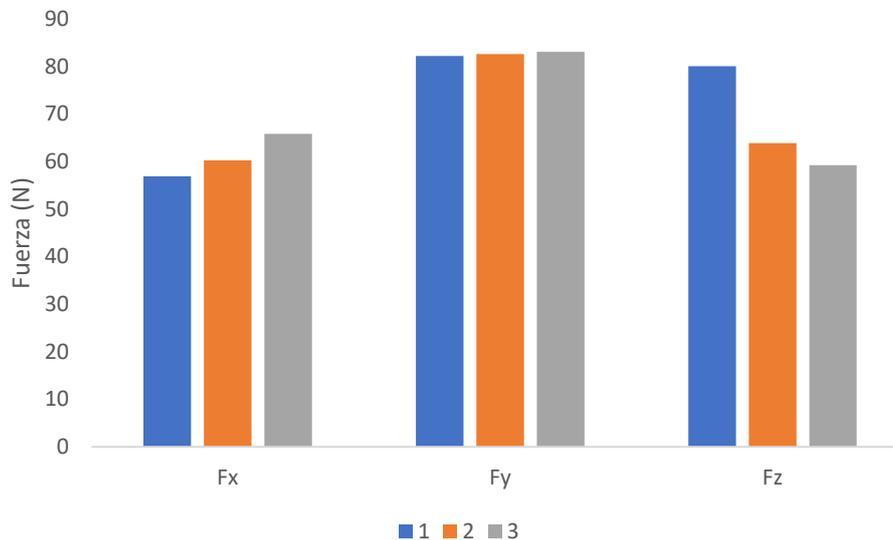


Figura 87. Resultados ensayos Aluminio.

4.2.2. Análisis fuerzas de corte en AISI 14404

Para analizar las fuerzas de corte en AISI 14404 se han realizado 4 ensayos con los siguientes parámetros de corte.

- Velocidad de corte: 120 m/min en los 2 primeros ensayos. 240 m/min en los 2 últimos ensayos.
- Velocidad de avance: 0.05 mm/rev.
- Profundidad de corte: 1 mm.

Este material también es llamado AISI 316L, y su composición química es la mostrada en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición química AISI 14404.

Fe	Cr	Mo	Ni
65%	17%	2%	10%

En el primer ensayo se usó una probeta de diámetro 18 mm (Figura 88). En los siguientes ensayos se usó la misma probeta con diámetro 16, 14 y 12 respectivamente. Los resultados son los representados en las Figura 89, Figura 90 y Figura 91.

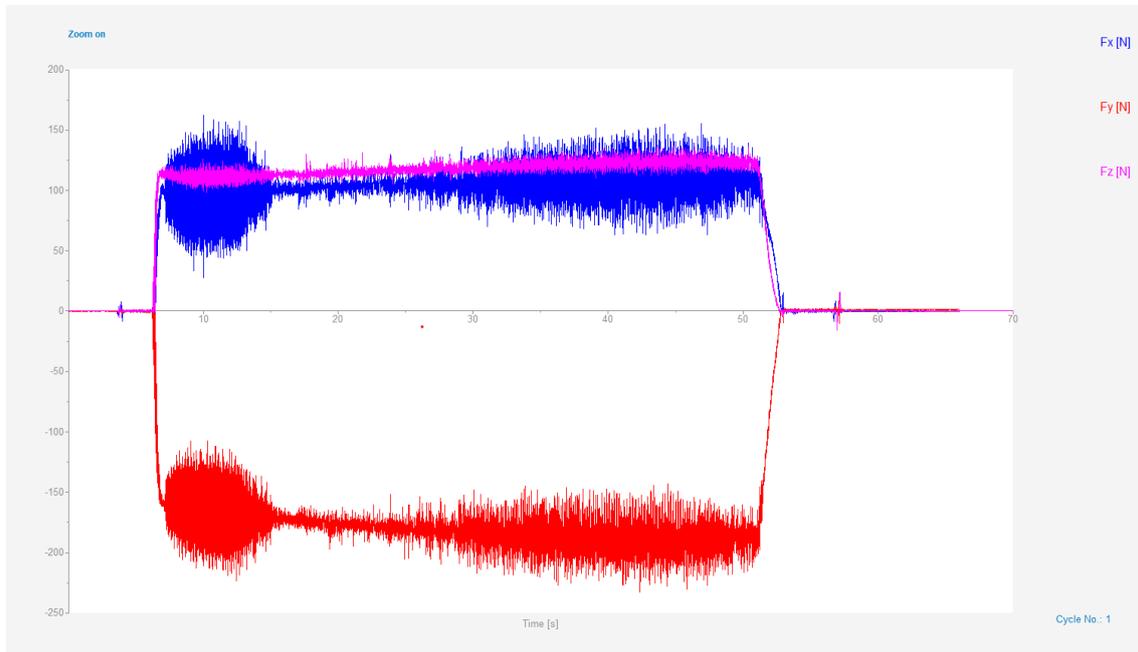


Figura 88. Ensayo AISI 14404 diámetro=18 mm.

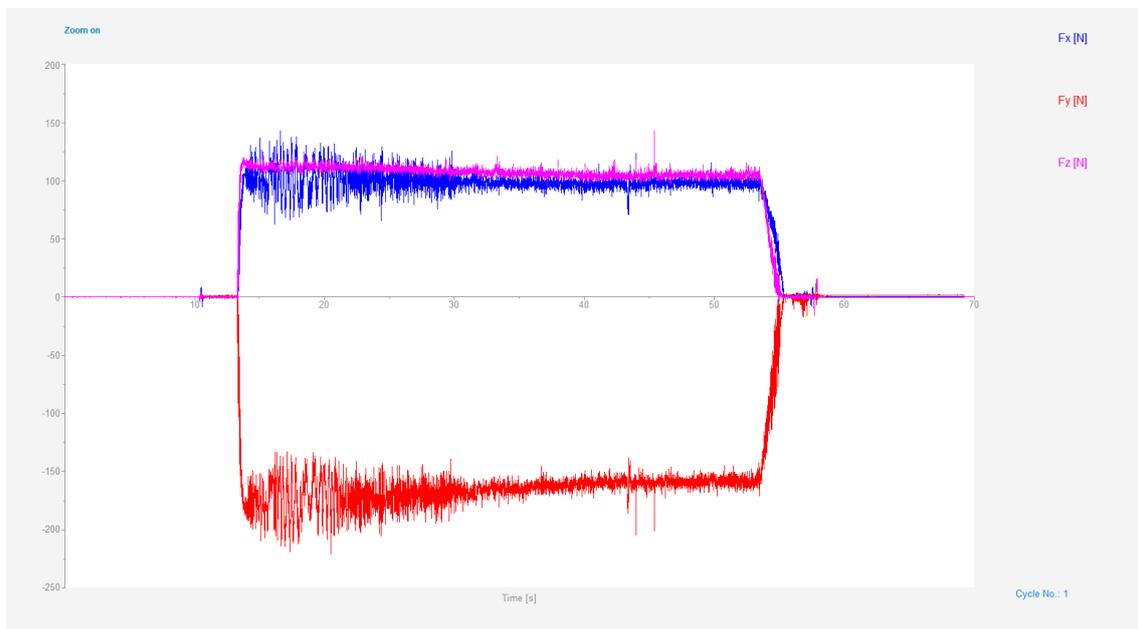


Figura 89. Ensayo AISI 14404 diámetro=16 mm.

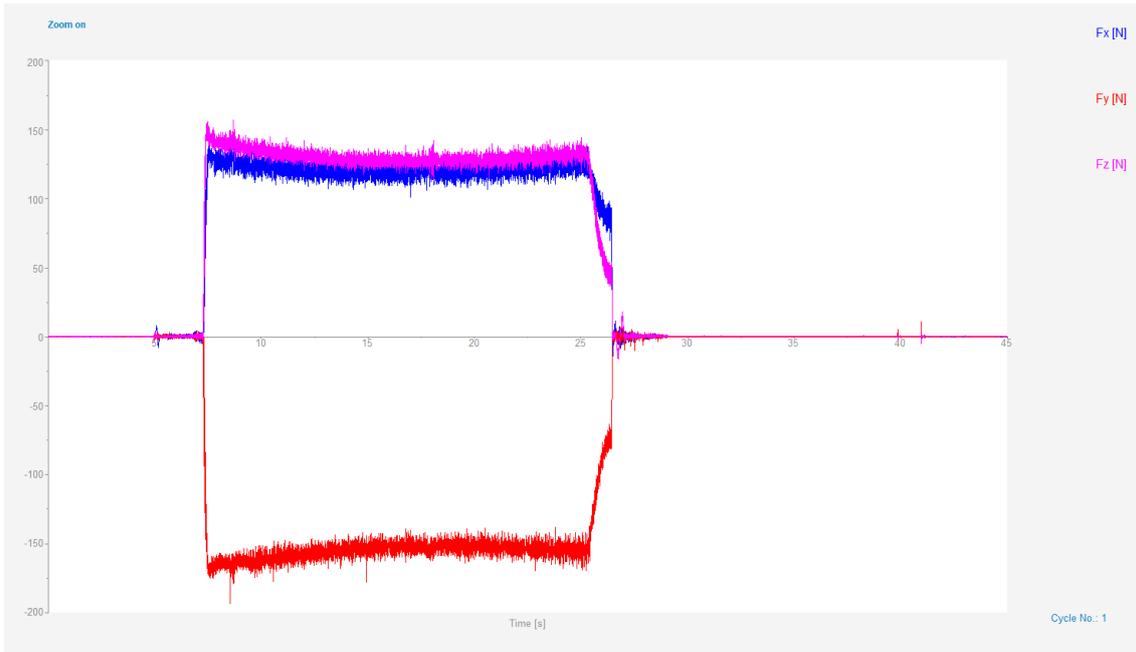


Figura 90. Ensayo AISI 14404 diámetro=14 mm.

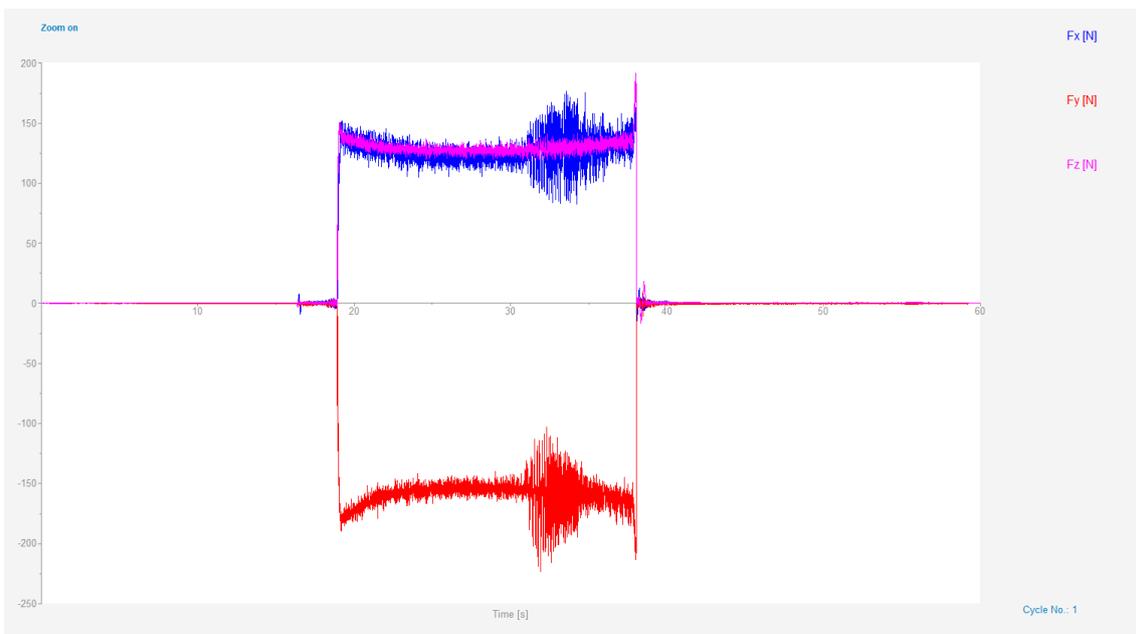


Figura 91. Ensayo AISI 14404 diámetro=12 mm.

A simple vista se puede apreciar que los dos primeros ensayos se realizan en la mitad de tiempo, debido a que se ha aumentado al doble la velocidad de corte, siendo la fuerza de corte similar en todas las pruebas. Comparando los 4 ensayos analíticamente (Figura 92), se puede comprobar que los 2 ensayos que se realizaron a una velocidad de corte menor tienen una fuerza de corte ligeramente superior a los ensayos que se realizaron a más velocidad. En la figura Figura 93 se ha hecho una gráfica resumen de las fuerzas obtenidas en función de la velocidad de corte.

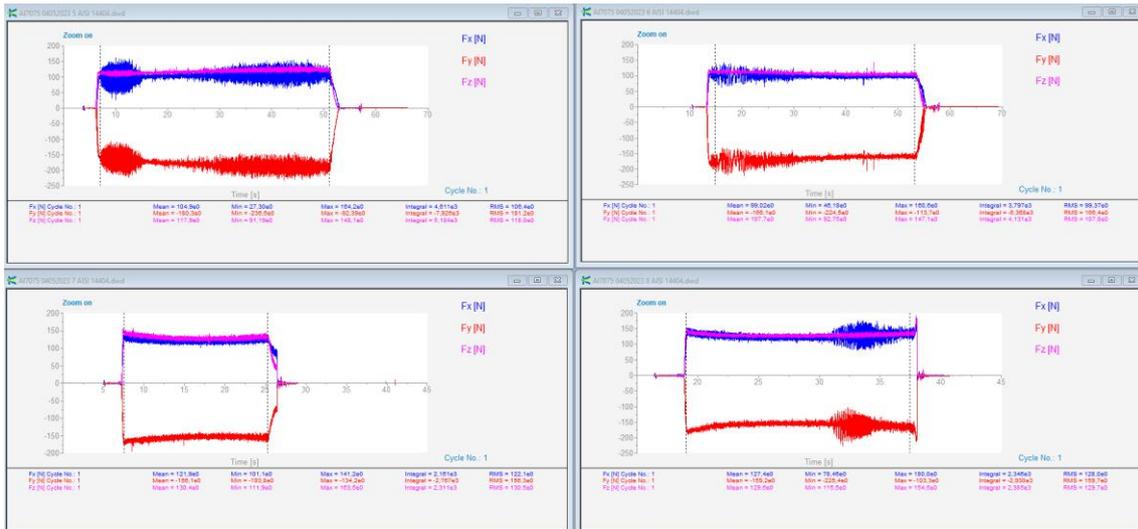


Figura 92. Comparativa ensayos AISI 14404.

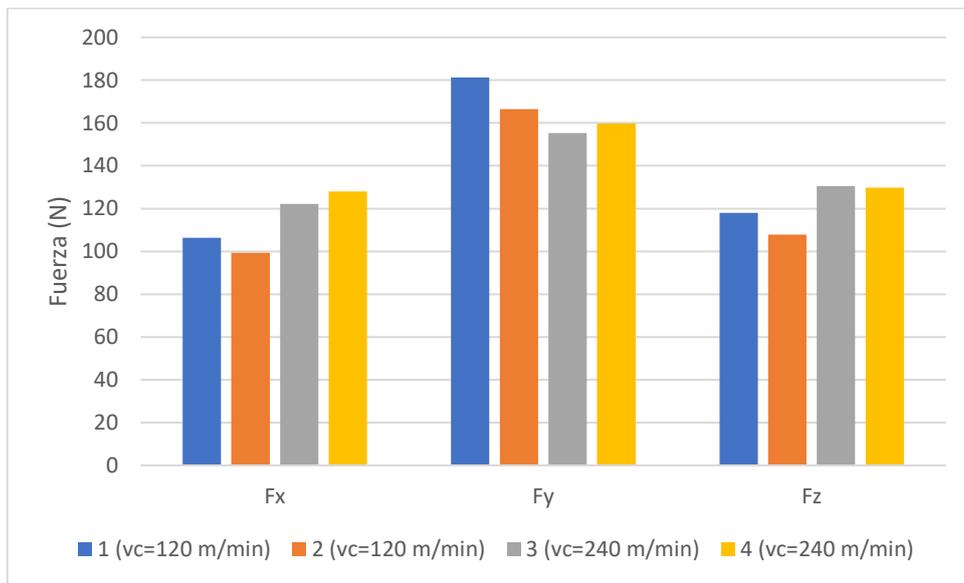


Figura 93. Resultados ensayos AISI 14404.

4.2.3. Análisis Fuerzas de corte en AISI 1045

Para analizar las fuerzas de corte en AISI 1045 se realizaron 3 ensayos con los siguientes parámetros de corte.

Ensayo 1:

- Velocidad de corte: 120 m/min.
- Velocidad de avance: 0.05 mm/rev.
- Profundidad de corte: 1 mm.

Ensayo 2:

- Velocidad de corte: 120 m/min.
- Velocidad de avance: 0.1 mm/rev.
- Profundidad de corte: 1 mm.

Ensayo 3:

- Velocidad de corte: 240 m/min.
- Velocidad de avance: 0.1 mm/rev.
- Profundidad de corte: 1 mm.

La composición química de este material es la mostrada en la Tabla 6.

En el primer ensayo se usó una probeta de diámetro 40 mm (Figura 94). En los siguientes ensayos se usó la misma probeta con diámetro 36 y 34 respectivamente (Figura 95 y Figura 96). Los resultados fueron los siguientes:

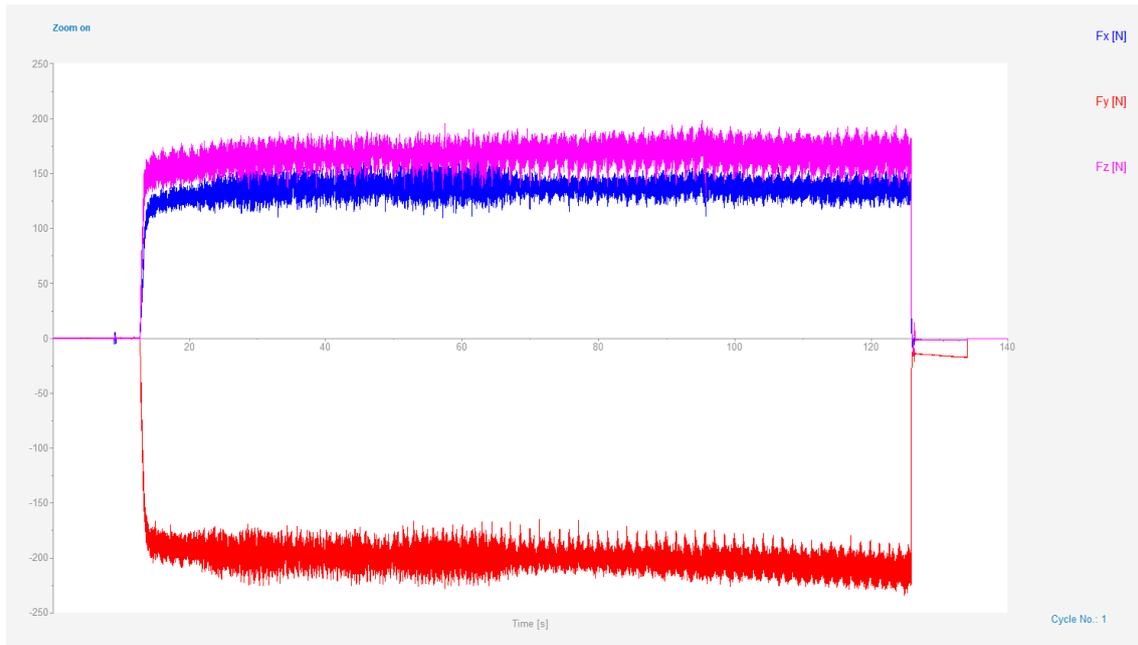


Figura 94. Ensayo AISI 1045 diámetro=40 mm.

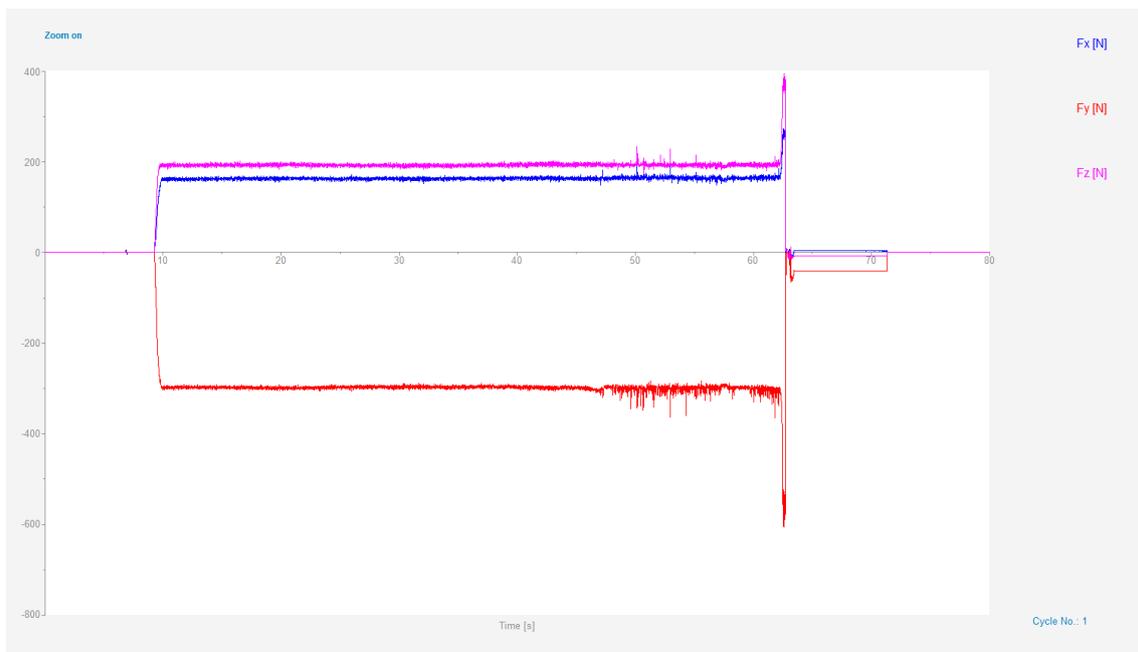


Figura 95. Ensayo AISI 1045 diámetro=38 mm.

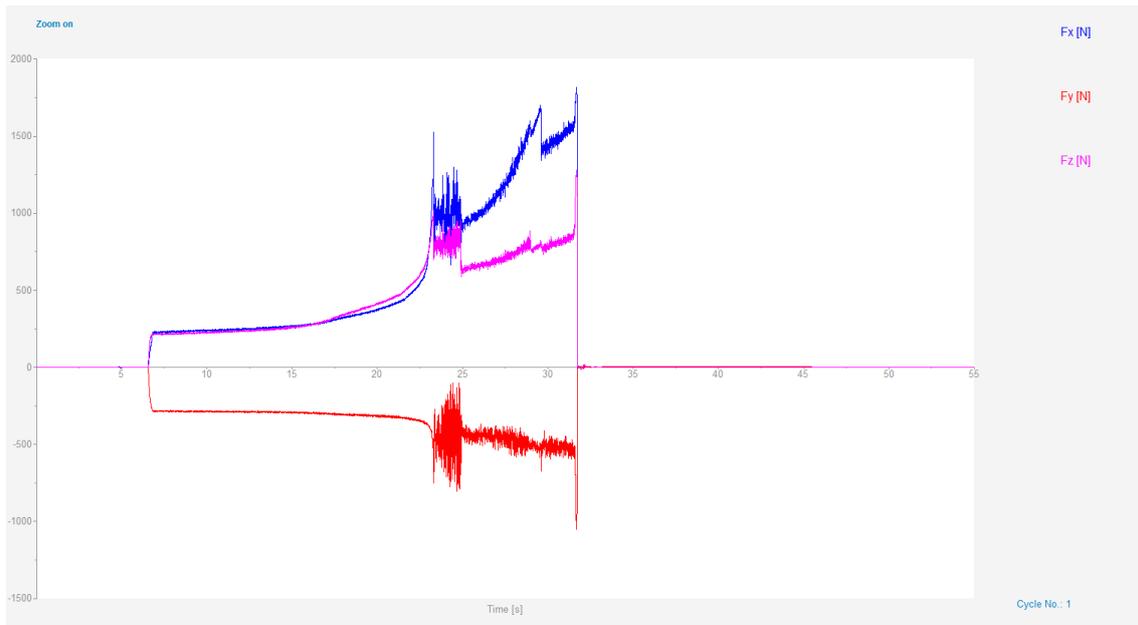


Figura 96. Ensayo AISI 1045 diámetro=36 mm.

En estos ensayos sí que se puede apreciar a simple vista que la fuerza de corte varía significativamente del primer al segundo ensayo al duplicar la velocidad de avance. En la Figura 97 se puede comprobar analíticamente que la diferencia es de prácticamente 100 N de un ensayo al otro.

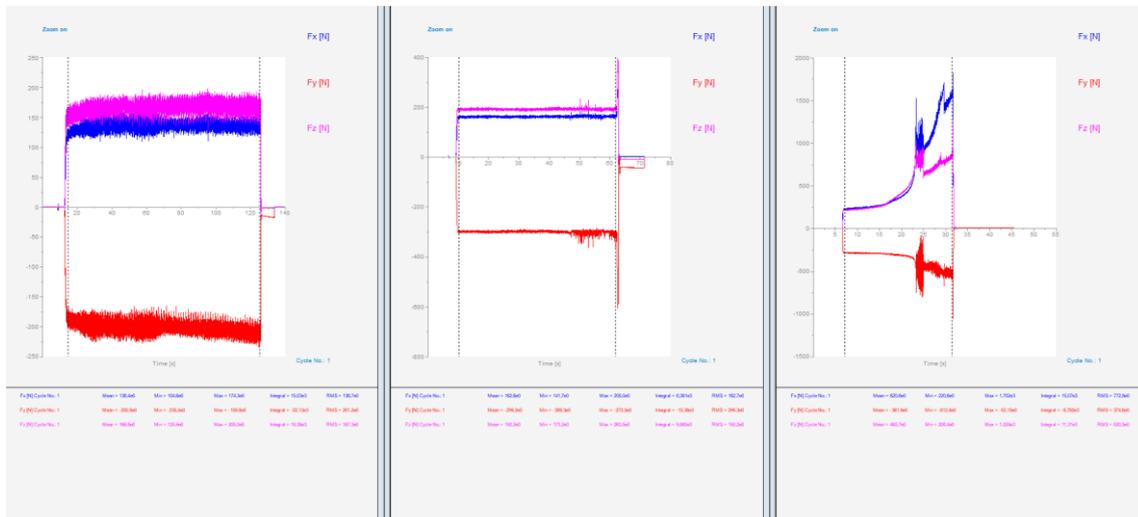


Figura 97. Comparativa ensayos AISI 1045.

En el tercer ensayo (Figura 96) ocurrió una rotura de la herramienta de corte (Figura 99), lo que provocó que las fuerzas de corte fueran incrementando desde el momento de la rotura. Sin embargo, antes del fallo, se puede observar que las fuerzas de corte eran muy similares al del segundo ensayo, a pesar de que se había duplicado la velocidad de corte (Figura 98). En la Figura 100 se puede ver la probeta tras el ensayo apreciándose el punto donde se produce la rotura de la plaquita.

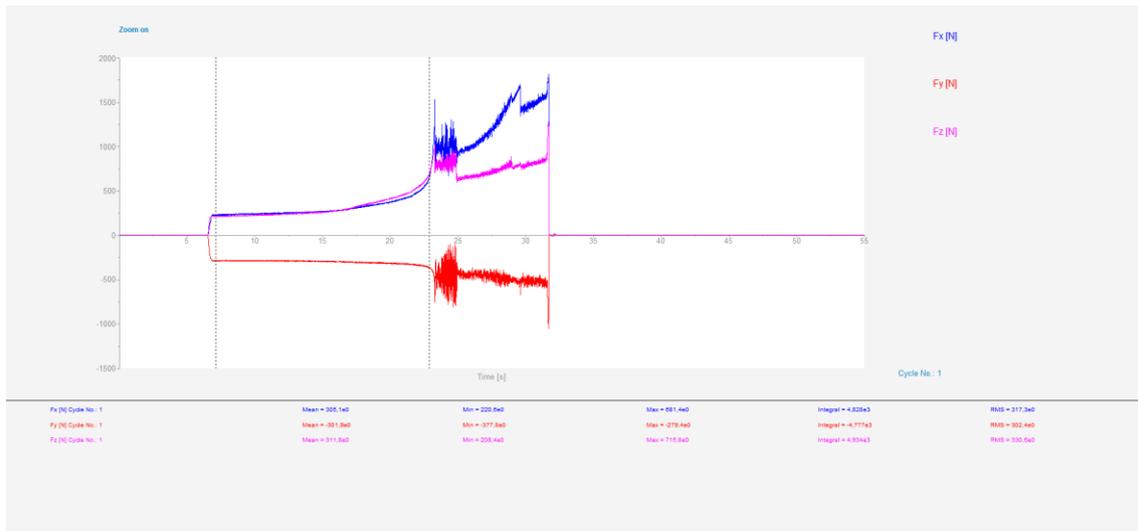


Figura 98. Fuerzas de corte ensayo AISI 1045 diámetro=36 mm.



Figura 99. Rotura herramienta de corte.



Figura 100. Probeta AISI 1045.

Se han graficado los resultados para poder hacer un correcto análisis de los mismos (Figura 101). Las barras 1 y 2 corresponden a los 2 primeros ensayos. Se puede apreciar, cómo se ha dicho anteriormente, un significativo aumento de la fuerza de corte entre estos 2 ensayos al duplicar la velocidad de avance. La barra 3 corresponde al tercer ensayo previo a la rotura de la herramienta de corte. Con ello se puede apreciar cómo, a pesar de duplicar la velocidad de corte, la fuerza de corte (F_y) se mantiene prácticamente constante, dejando ver como la velocidad de avance es un factor mucho más crítico en lo que fuerzas de corte se refiere. Sin embargo, al duplicar la velocidad de corte se produjo la rotura de la herramienta por lo que sin duda también es un parámetro a tener en cuenta. Por último, la barra 4 hace referencia al valor medio de la fuerza de corte durante el ensayo completo. Con esto podemos ver como se disparan las fuerzas de corte tras la rotura de la herramienta.

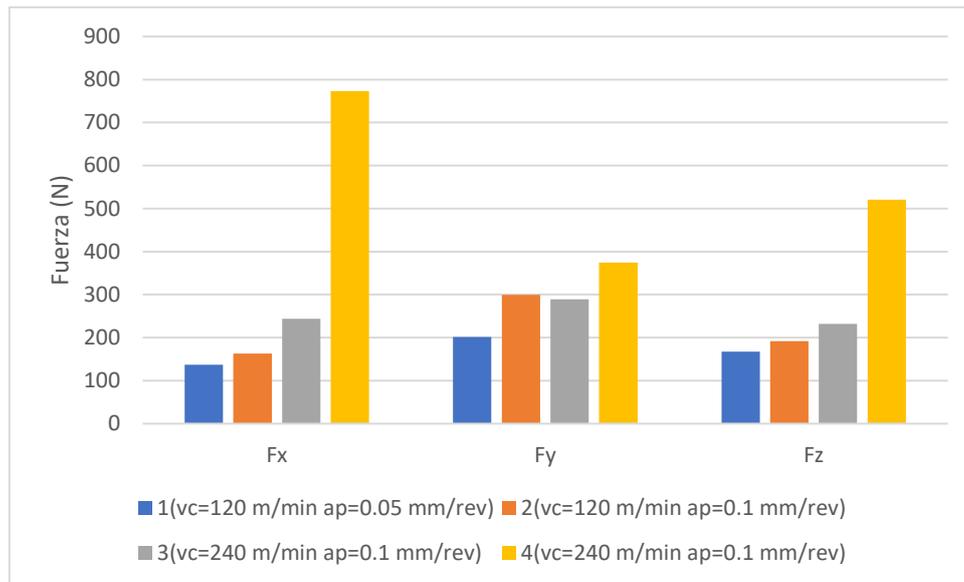


Figura 101. Resultados AISI 1045.

4.3. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en este apartado del proyecto se ha podido validar el correcto funcionamiento del dinamómetro piezoeléctrico. Haciendo uso de la literatura, por comparación se han obtenido resultados muy similares corroborando el buen funcionamiento del dispositivo de medición de fuerzas.

Tras la realización de diversos ensayos con variedad de parámetros de corte y materiales se ha podido comprobar en la práctica, que como dice la teoría, las fuerzas de corte aumentan con la velocidad de avance. Sin embargo, también se ha comprobado que la velocidad de corte es un parámetro que afecta en menor grado a las fuerzas de corte en un proceso de torneado, ya que incluso duplicándolo en los ensayos anteriores, apenas varía la magnitud de las mismas. Otro parámetro que también se ha variado en todos los ensayos es el diámetro del material. Así se ha podido también comprobar la correcta calibración del dinamómetro ya que las fuerzas de corte no variaban al ser el diámetro un parámetro que no afecta a la magnitud de las mismas.

En conclusión, con los ensayos anteriores se ha podido determinar que el parámetro de corte que más afecta a las fuerzas es la velocidad de avance, por tanto, es un parámetro fundamental a tener en cuenta para poder monitorizar un proceso de torneado.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



CAPÍTULO 5. Conclusiones

El presente trabajo ha abordado la instalación puesta a punto y validación de un dinamómetro piezoeléctrico para un centro de torneado.

Mediante una investigación previa llevada a cabo se ha podido comprender mejor el concepto fuerza de corte, como se descompone y como varía en función de diferentes materiales y parámetros de corte. Además, se ha analizado el principio de funcionamiento de los dispositivos de medición de fuerzas, en concreto el de un dinamómetro piezoeléctrico, que funciona gracias al material piezoeléctrico que lo compone. También, con la elaboración de este trabajo se logró una mayor comprensión en las operaciones de arranque de viruta, en concreto en un torneado.

Tras un estudio de los componentes del dinamómetro, así como de su software de análisis de datos asociado (Dynoware) se ha realizado una guía de instalación, puesta a punto y uso del dinamómetro piezoeléctrico marca Kistler para un centro de torneado.

Con unos ensayos con titanio y acero inoxidable, comparándolos con referencias bibliográficas se ha conseguido comprobar el correcto funcionamiento del dinamómetro, consiguiéndose así la validación del mismo.

Además de estos ensayos también se han realizado otros con aluminio 7075, AISI 14404 y AISI 1045 con diferentes parámetros de corte como la velocidad de giro y de avance con el fin de comprender el análisis de fuerzas. Con estos ensayos se ha podido comprobar que la velocidad de avance es un parámetro muy influyente en la magnitud de las fuerzas de corte en un proceso de torneado. Sin embargo, también se ha comprobado como la velocidad de giro, a pesar de ser un parámetro que afecta a las fuerzas de corte, no es tan relevante en la magnitud de las fuerzas de corte como sí lo es velocidad de avance.

Además, con el último ensayo realizado con AISI 1045 se produjo una rotura de la herramienta de corte lo que demuestra la importancia de una buena monitorización del proceso de corte, ya que se podría haber previsto esta rotura. En la industria una buena monitorización del proceso de corte podría optimizar los procesos de producción, garantizar la calidad de las piezas fabricadas y contribuir a la mejora de la eficiencia y rentabilidad de la maquinaria usada.

También se ha realizado un guía de instalación, puesta a punto y uso del dinamómetro piezoeléctrico marca Kistler para un centro de torneado, usando el software de análisis de datos Dynoware.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



CAPÍTULO 6. Referencias Bibliográficas

- [1] Grupo de investigación TEP 933 «Ingeniería de Fabricación» de la Universidad de Málaga, «Sistema experto para la mejora de la integridad superficial en el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras. Convocatoria de 2021 de “PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO” en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023».
- [2] T. Rodríguez -Moliner, M. Jacas -Cabrera, F. Martínez -Aneiro, y Y. García -Muñoz, «Influencia de los parámetros de corte en el espesor de la zona de deformación plástica secundaria Influence of cutting parameters on the thickness of the secondary-plastic-deformation zone», *Ingeniería Mecánica*, vol. 13, n.º 3, pp. 56-63, 2010.
- [3] R. Bhogal, M. Singh, y A. Madan, «Cutting force & thermal analysis during turning using Ansys», *Mater Today Proc*, pp. 3577-3584, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.001.
- [4] L. W. Hernández-González, D. A. Curra-Sosa, R. Pérez-Rodríguez, y P. D. C. Zambrano-Robledo, «Modeling Cutting Forces in High-Speed Turning using Artificial Neural Networks», *TecnoLógicas*, vol. 24, n.º 51, p. e1671, abr. 2021, doi: 10.22430/22565337.1671.
- [5] Kistler, «Theory of Cutting Force». [En línea]. Disponible en: www.kistler.com
- [6] G. Mikell, *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and Systems 4th Edition*. 1996.
- [7] M. E. Merchant, «Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip», *J Appl Phys*, vol. 16, n.º 5, pp. 267-275, 1945, doi: 10.1063/1.1707586.
- [8] P. P. Monka, K. Monkova, M. Vasina, M. Kubisova, M. Korol, y A. Sekerakova, «Effect of Machining Conditions on Temperature and Vickers Microhardness of Chips during Planing», *Metals (Basel)*, vol. 12, n.º 10, oct. 2022, doi: 10.3390/met12101605.
- [9] «Fundamentos de los Procesos de Mecanizado». <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html>
- [10] «Manuale di Formazione Tecnica», 2017. [En línea]. Disponible en: www.sandvik.coromant.com
- [11] D. Martinez Kraemer, «Guía práctica para la selección de insertos de mecanizado Foundry technology View project Machining of low machinability materials View project», 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.24174.82242.
- [12] MANUEL SÁNCHEZ CARRILERO y MARIANO MARCOS BÁRCENA, «Relaciones paramétricas en el mecanizado», 1994.
- [13] «Fuerza de corte | Kistler». <https://www.kistler.com/es/glosario/termino/fuerza-de-corte/> (accedido 8 de noviembre de 2022).
- [14] «DINAMOMETRO - Que es, tipos y como funciona un dinamómetro». <https://comofunciona.co/un-dinamometro/> (accedido 9 de noviembre de 2022).

- [15] «Sensores piezoeléctricos vs extensométricos | Kistler». <https://www.kistler.com/ES/es/sensores-piezoelctricos-vs-extensometricos/C00000145> (accedido 1 de diciembre de 2022).
- [16] «Sensores piezoeléctricos: ¿cuál necesito para mi aplicación | HBM». <https://www.hbm.com/es/6810/guia-de-seleccion-de-sensores-piezoelctricos/> (accedido 10 de noviembre de 2022).
- [17] C. H. Lauro, L. C. Brandão, D. Baldo, R. A. Reis, y J. P. Davim, «Monitoring and processing signal applied in machining processes - A review», *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 58. Elsevier B.V., pp. 73-86, 1 de diciembre de 2014. doi: 10.1016/j.measurement.2014.08.035.
- [18] R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, y D. Dornfeld, «Advanced monitoring of machining operations», *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 59, n.º 2, pp. 717-739, 2010, doi: 10.1016/j.cirp.2010.05.010.
- [19] E. García Plaza y P. J. Núñez López, «Analysis of cutting force signals by wavelet packet transform for surface roughness monitoring in CNC turning», *Mech Syst Signal Process*, vol. 98, pp. 634-651, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.05.006.
- [20] J. Tlustý y G. C. Andrews, «A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining Touch Trigger Probes», 1983.
- [21] H. K. Tonshoff, J. P. Wulfsberg, hK Tonshoff, P. Wdlfsberc, y U. of Hannover, «Developments and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes A. van Luttervelt (1); Delft University», W. Konig, 1988.
- [22] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Konig, y R. Teti, «Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of research and Industrial Application», 1995.
- [23] D. C. D. Oguamanam, H. Raafat, y S. M. Taboun, «A machine vision system for wear monitoring and breakage detection of single-point cutting tools», *Comput Ind Eng*, vol. 26, n.º 3, pp. 575-598, 1994, doi: 10.1016/0360-8352(94)90052-3.
- [24] S. Kurada y C. Bradley, «A review of machine vision sensors for tool condition monitoring», 1997.
- [25] Y. Altintas, «In-process detection of tool breakages using time series monitoring of cutting forces», *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 28, n.º 2, pp. 157-172, 1988, doi: 10.1016/0890-6955(88)90027-2.
- [26] M. A. Elbestawi, T. A. Papazafiriou, y R. X. Du, «IN-PROCESS MONITORING OF TOOL WEAR IN MILLING USING CUTTING FORCE SIGNATURE», 1991.
- [27] H. Saglam y A. Unuvar, «Tool condition monitoring in milling based on cutting forces by a neural network», *Int J Prod Res*, vol. 41, n.º 7, pp. 1519-1532, may 2003, doi: 10.1080/0020754031000073017.
- [28] G. Sutter y A. Molinari, «Analysis of the cutting force components and friction in high speed machining», *J Manuf Sci Eng*, vol. 127, n.º 2, pp. 245-250, 2005, doi: 10.1115/1.1863253.
- [29] B. S. Berger, I. Minis, J. Harley, M. Rokni, y M. Papadopoulos, «WAVELET BASED CUTTING STATE IDENTIFICATION», 1998.

- [30] T. I. El-Wardany, D. Gao, y M. A. Elbestawi, «TOOL CONDITION MONITORING IN DRILLING USING VIBRATION SIGNATURE ANALYSIS», 1996.
- [31] M. Siddhpura y R. Paurobally, «A review of chatter vibration research in turning», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 61. Elsevier Ltd, pp. 27-47, 2012. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007.
- [32] D. Dimla Sr y P. Lister, «On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses», 2000.
- [33] J. C. Chen y W.-L. Chen, «A tool breakage detection system using an accelerometer sensor», 1999.
- [34] D. Dimla Sr y P. Lister, «On-line metal cutting tool condition monitoring. II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks», 2000.
- [35] H. Cao, Y. Lei, y Z. He, «Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert-Huang transform», *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 69, pp. 11-19, 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.007.
- [36] M. Liu, S. Y. Liang, M. Liu, y S. Y. Liang, «ANALYTICAL MODELING OF ACOUSTIC EMISSION FOR MONITORING OF PERIPHERAL MILLING PROCESS», 1991.
- [37] A. A. Houshmand, E. Kannatey-Asibu, y G. D. Herrin, «A DYNAMIC MODEL FOR TOOL WEAR DETECTION USING ACOUSTIC EMISSION», 1995.
- [38] B. Y. Lee y Y. S. Tarn, «Application of the Discrete Wavelet Transform to the Monitoring of Tool Failure in End Milling Using the Spindle Motor Current», 1999.
- [39] X. Li, S. K. Tso, y J. Wang, «Real-time tool condition monitoring using wavelet transforms and fuzzy techniques», *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 30, n.º 3, pp. 352-357, 2000, doi: 10.1109/5326.885116.
- [40] L. Xiaoli, «On-line detection of the breakage of small diameter drills using current signature wavelet transform 1», 1999.
- [41] G. Byrne, D. Dornfeld, y B. Denkena, «Advancing Cutting Technology», 2004.
- [42] W. J. Deng, Q. Li, B. L. Li, Y. T. He, W. Xia, y Y. Tang, «Study on the cutting force of cylindrical turning with novel restricted contact tools», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, n.º 5-8, pp. 1625-1638, nov. 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5137-0.
- [43] J.-D. Kim y D.-S. Kim, «Development of a combined-type tool dynamometer with piezo-film accelerometer for an ultra-precision lathe», 1997.
- [44] T. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, y Y. Yamane, «Experimental methods», *Metal Machining*, pp. 136-158, ene. 2000, doi: 10.1016/B978-0-08-052402-3.50008-3.
- [45] S. Yaldiz y F. Ünsaçar, «A dynamometer design for measurement the cutting forces on turning», *Measurement (Lond)*, vol. 39, n.º 1, pp. 80-89, ene. 2006, doi: 10.1016/j.measurement.2005.07.008.
- [46] S. Yaldiz, F. Ünsaçar, H. Sağlam, y H. Işık, «Design, development and testing of a four-component milling dynamometer for the measurement of cutting force and torque», *Mech*

- Syst Signal Process*, vol. 21, n.º 3, pp. 1499-1511, abr. 2007, doi: 10.1016/J.YMSSP.2006.06.005.
- [47] E. S. Topal y C. Çoğun, «A cutting force induced error elimination method for turning operations», *J Mater Process Technol*, vol. 170, n.º 1-2, pp. 192-203, dic. 2005, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.05.003.
- [48] T. H. Panzera, P. R. Souza, J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, y T. R. Mansur, «Development of a three-component dynamometer to measure turning force», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, n.º 9-12, pp. 913-922, oct. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3866-5.
- [49] L. W. Hernández-González, D. A. Curra-Sosa, R. Pérez-Rodríguez, y P. D. C. Zambrano-Robledo, «Modeling Cutting Forces in High-Speed Turning using Artificial Neural Networks», *TecnoLógicas*, vol. 24, n.º 51, p. e1671, abr. 2021, doi: 10.22430/22565337.1671.
- [50] M. R. Dijmarescu, «Experimental study on cutting forces developed during dry turning of a CoCrWNi alloy», en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, feb. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/473/1/012018.
- [51] A. Polishetty, M. Shunmugavel, M. Goldberg, G. Littlefair, y R. K. Singh, «Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V», *Procedia Manuf*, vol. 7, pp. 284-289, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.
- [52] A. Mahamani, «Influence of Process Parameters on Cutting Force and Surface Roughness During Turning of AA2219-TiB 2 /ZrB 2 In-situ Metal Matrix Composites», *Procedia Materials Science*, vol. 6, pp. 1178-1186, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.191.
- [53] E. M. (Edward M. Trent, *Metal cutting*. Butterworths, 1977. Accedido: 2 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780408106030/metal-cutting>
- [54] M. Danish, T. L. Ginta, M. Yasir, y A. M. A. Rani, «Light alloys and their machinability», en *Machining of Light Alloys*, CRC Press, 2018, pp. 1-34. doi: 10.1201/b22153-1.
- [55] G. Campatelli y A. Scippa, «Prediction of milling cutting force coefficients for aluminum 6082-T4», en *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2012, pp. 563-568. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.100.
- [56] J. Salguero, M. Batista, M. Calamaz, F. Girot, y M. Marcos, «Cutting forces parametric model for the dry high speed contour milling of aerospace aluminium alloys», en *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 735-742. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.215.
- [57] L. E. Loh *et al.*, «Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061», *Int J Heat Mass Transf*, vol. 80, pp. 288-300, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014.
- [58] N. Fang y Q. Wu, «The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys», *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 45, n.º 10, pp. 1178-1187, ago. 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.12.003.
- [59] A. R. Chambers, «The machinability of light alloy MMCs», 1996.
- [60] H. Demir y S. Gündüz, «The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy», *Mater Des*, vol. 30, n.º 5, pp. 1480-1483, may 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.08.007.

- [61] K.-H. Fuh y H.-Y. Chang, «An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design», 1997.
- [62] A. Manna y B. Bhattacharyya, «A study on different tooling systems during machining of Al/SiC-MMC», 2002.
- [63] R. Yousefi y Y. Ichida, «A study on ultra-high-speed cutting of aluminium alloy: Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface», 2000.
- [64] S. Larbi, S. Djebali, y A. Bilek, «Study of High Speed Machining by Using Split Hopkinson Pressure Bar», en *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 314-321. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.074.
- [65] P. D. Hartung y M. Kramer, «Tool Wear in Titanium Machining».
- [66] A. Jawaid, C. H. Che-Haron, y A. Abdullah, «Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246», 1999.
- [67] A. Jawaid, S. Sharif, y S. Koksai, «Evaluation of wear mechanisms of coated carbide tools when face milling titanium alloy», 2000.
- [68] A. Polishetty, M. Shunmugavel, M. Goldberg, G. Littlefair, y R. K. Singh, «Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V», *Procedia Manuf*, vol. 7, pp. 284-289, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.
- [69] A. Kannan y N. M. Sivaram, «Optimization of process parameters for cutting force minimization in dry turning of aluminium 6063 using taguchi approach», *Mater Today Proc*, may 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.063.
- [70] K. Group, «Multicomponent Dynamometer-10 ... 10 kN, cover plate 90x105 mm», 2009. [En línea]. Disponible en: www.kistler.com
- [71] «Instruction Manual 3-Component Measuring System for Cutting Force Measurement During Turning Type 9129A».
- [72] K. Group, «Electronics & Software Kistler LabAmp for DynoWare Charge amplifier and data acquisition for multicomponent force measurement», 2017. [En línea]. Disponible en: www.kistler.com
- [73] Kistler, «Instruction Manual 3-Component Measuring System for Cutting Force Measurement During Turning Type 9129A».
- [74] K. Group, «Multicomponent Dynamometer-10 ... 10 kN, cover plate 90x105 mm», 2009. [En línea]. Disponible en: www.kistler.com
- [75] L. Sevilla Hurtado, M. Marcos Bárcena, y Y. Sánchez Hernández, «Tesis Doctoral Metodología para la Caracterización del Mecanizado de Aleaciones Ligeras de uso Aeronáutico a través del Análisis de la Viruta», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://orcid.org/0000-0001-5017-5501>
- [76] M. Kumar Gupta, M. E. Korkmaz, M. Sarıkaya, G. M. Krolczyk, y M. Günay, «In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study», *Mech Syst Signal Process*, vol. 169, abr. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108772.

- [77] C. J. Rao, D. N. Rao, y P. Srihari, «Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation», en *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 1405-1415. doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.222.
- [78] M. C. Cakir y Y. Isik, «Detecting tool breakage in turning aisi 1050 steel using coated and uncoated cutting tools», *J Mater Process Technol*, vol. 159, n.º 2, pp. 191-198, ene. 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.05.006.
- [79] R. A. Mali, M. D. Agrahari, y T. V. K. Gupta, «FE based simulation and experimental validation of forces in dry turning of aluminium 7075», en *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 2319-2323. doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.120.