

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**Estudio experimental de fuerzas de corte en el
fresado de un acero AISI 316L ASS**

- Trabajo Fin de Grado -
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Diego González López

Tutor: Manuel San Juan Blanco

Departamento: Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación y de Materiales

Valladolid, Septiembre 2015





RESUMEN, PALABRAS CLAVE (ABSTRACT, KEYWORDS)

Este trabajo trata sobre el comportamiento que tiene un acero AISI 316-L ASS al ser fresado mediante dos tipos de procedimiento: Fresado en concordancia y fresado en oposición.

Para realizar este estudio se ha instalado un dinamómetro Kistler en la herramienta, con el objetivo de medir las fuerzas de corte que intervienen en el mecanizado. Estas fuerzas se procesan con un sistema de adquisición de datos "WaveBook/512" y se analizan posteriormente con el software "DasyLab 8.0", un sistema de tratamiento de datos.

También se incluye complementariamente un estudio realizado de rugosidades en las placas para analizar el estado superficial de este material en el post-mecanizado, así como un estudio micrográfico con el fin de hacer más completo este trabajo.

This work is about the behaviour that have AISI 316L ASS steels after be machining with two types of milling: Down milling and up milling.

To do possible this study it has been installed a Kistler dynamometer in the tool, to measure the cutting forces that are present in this machining process. These forces are processed with a data acquisition system called "WaveBook/512" and after, they are analyzed with the software "DasyLab 8.0", a data processing system.

Also, it's included at this work a rugosity study to analyze the surface condition of this material after be machining, and a micrograph study to do better this work.





INDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	9
2. ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1. Material empleado en el mecanizado. Acero AISI 316-L ASS	14
2.2. Características del proceso de fresado. Fresado en concordancia y en oposición	24
2.3. Características de la plaquita utilizada y los parámetros del mecanizado	46
3. CADENA DE MEDIDA	61
3.1. Introducción.....	61
3.2. Objetivos.....	62
3.3. Características de la cadena de medida	64
3.4. Elementos necesarios para el ensayo	69
3.5. Metodología del ensayo	83
3.5.1. Herramientas del ensayo	83
3.5.2. Material a mecanizar	84
3.5.3. Sistema de recogida de datos.....	86
3.5.4. Proceso de tratamiento de datos	99
4. CONDICIONES DE TRABAJO Y RESULTADOS.....	119
4.1. Introducción.....	122
4.2. Fuerzas de corte.....	130
4.3. Análisis de rugosidad de las placas	152
4.4. Estudio micrográfico de las placas mecanizadas	158
5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	169
6. BIBLIOGRAFÍA.....	175
7. ANEXOS.....	184





CAPÍTULO I

Introducción y objetivos





1. Introducción y objetivos

El propósito de realizar este proyecto es el de continuar con un conjunto de estudios previamente realizados en este mismo departamento sobre mecanizado, donde se tratan tipos de procesos como el canteado, torneado, taladrado o en este caso el fresado.

Este trabajo tiene como objetivo la mejora y optimización de las condiciones de corte para el mecanizado en un acero inoxidable austenítico AISI 316-L y tener un conocimiento más profundo sobre lo que acontece en el fresado ortogonal.

Se pretende realizar un estudio y posterior comparación para este tipo de acero austenítico entre los dos tipos de fresado tangencial u ortogonal: en concordancia (en inglés "Down -milling") y en oposición o fresado normal ("Up - milling" en inglés).

Aunque luego se tratará más a fondo sobre estos dos tipos de fresado, como primera aproximación podemos establecer la siguiente definición de ambos:

-En el fresado en concordancia, la herramienta gira en el mismo sentido en el que avanza la pieza, de tal modo que se corta de mayor a menor espesor de viruta. Este tipo de fresado es también conocido como "Down-milling" debido a que, cuando el eje de giro de la fresa es horizontal, la componente vertical de la fuerza de corte está dirigida hacia abajo.

-En el fresado en oposición, también conocido como "Up-milling", ocurre lo contrario, es decir, la herramienta gira en sentido contrario al avance de la pieza y la componente vertical de la fuerza de corte se dirige hacia arriba. El espesor de viruta cortado por la fresa va de menor a mayor.

Lo que se pretende buscar con este estudio de fuerzas y parámetros de corte para el proceso de fresado, es optimizar el proceso en el mecanizado de una pieza de acero austenítico AISI 316-L. También se busca establecer una serie de relaciones entre los propios parámetros de corte, las fuerzas del proceso y el espesor de viruta mecanizado.

Las fuerzas y parámetros de corte se estudian a través de un dinamómetro instalado en el centro de la herramienta que es capaz de proporcionarnos los valores de las fuerzas y momentos que intervienen en el fresado para cada una de las condiciones de fresado establecidas, y a través de dichos datos obtenidos se podrá conocer la potencia de corte, la fuerza de corte, la fuerza radial y la fuerza



resultante, y establecer relaciones de las mismas con el espesor de viruta, la temperatura del mecanizado o el acabado superficial.

Para la interpretación de estos resultados medidos durante los ensayos por el dinamómetro, nos ayudaremos del software de adquisición y análisis de datos, "DasyLab 8.0".

Se mostrará a su vez en este trabajo, un estudio de rugosidades del material mecanizado y un estudio de la micro-estructura, con el propósito de hacer más completo este proyecto, y tener una visión más amplia de lo que acontece a este tipo de acero austenítico al ser fresado de dos diferentes maneras.



CAPÍTULO II

Estado del arte





2. Estado del Arte

En este apartado se tratará de diferentes temas que son de especial relevancia para la elaboración de este proyecto.

Primero se realiza un estudio sobre el tipo de material que se ha empleado en este estudio, el acero AISI 316L ASS.

En segundo lugar se da una breve definición sobre el proceso de fresado y qué sub-procesos engloba.

Posteriormente se pasa a tratar sobre los dos tipos de fresado ortogonal con los que se realizan los ensayos, como son el fresado en concordancia y el fresado en oposición ("Up-milling" y "Down-milling" en inglés), y se estudian las diferencias entre los dos métodos y qué parámetros y fuerzas en el proceso de corte intervienen en ambos.

Para finalizar esta categoría del proceso de fresado, se presentan las expresiones generales que rigen este procedimiento de mecanizado, y sobre las cuáles se rigen los diferentes programas con los que se ha trabajado en laboratorio.

Además se relacionan los parámetros que intervienen en el fresado, dando a conocer cuáles son más recomendables según el caso, y qué consecuencias puede traer o no el seguir dichas recomendaciones basadas en los parámetros internos y externos que afectan al mecanizado.

Por último, se exponen las características principales de la plaquita utilizada en los ensayos.

Tras esta pequeña introducción, procedemos a explicar el tipo de acero empleado y sus características principales.

2.1. Material empleado en el mecanizado. Acero AISI 316-L ASS

El material de las piezas mecanizadas utilizadas para este proyecto, es un acero austenítico inoxidable.

Los aceros se caracterizan porque tienen un contenido disuelto de carbono en el hierro, y el carbono forma una solución sólida con el hierro.

Según el contenido en carbono que presenta el hierro, tendríamos diferentes tipos de aceros, cada uno de ellos con unas características distintas según la temperatura y contenido de carbono, según se muestra en la **Imagen 1**.

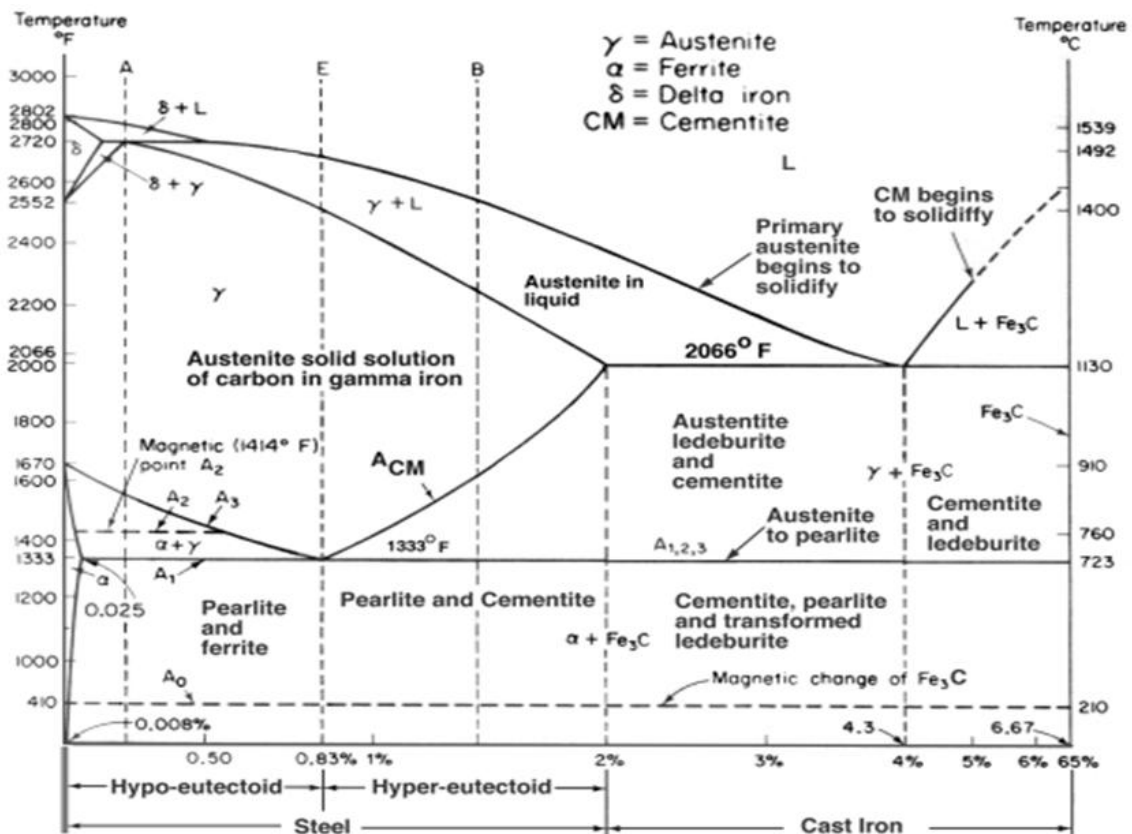


Imagen 1. Diagrama Fe - C.



Como características generales que presentan los aceros austeníticos, cabe destacar que presentan altos contenidos de aleaciones con el objetivo claro de estabilizar la austenita y además que no suelen ser susceptibles de tratamientos térmicos.

Las principales propiedades de la austenita son:

- Máxima solubilidad: 2,11 % de C a 1148 °C
- Rm= 88 ÷ 105 (Kg/mm²)
- Dureza 300 HB
- Carácter no magnético
- Dúctil, tenaz y muy densa
- Gran resistencia al desgaste y la corrosión
- Estable a elevadas temperaturas

Las aleaciones pretenden en general aumentar la templabilidad, mejorar las propiedades mecánicas a altas temperaturas, mejorar la resistencia a la corrosión o aumentar la resistencia al desgaste entre otras muchas pretensiones.

El acero inoxidable austenítico empleado, AISI 316L, presenta un contenido en Carbono de 0,03%, es decir es un acero Hipo-Eutectoide ya que presenta un contenido de Carbono inferior al 0,8%.

La composición porcentual de este acero inoxidable austenítico es la mostrada en la siguiente **Tabla 1**:

Composición química del AISI 316L ASS en % de componentes			
C	Cr	Ni	Mo
0.03	17.78	11.71	2.37

Tabla 1. Composición química del acero AISI 316L



Teniendo en cuenta la composición porcentual que lo forma, podemos sacar las siguientes conclusiones:

-El alto contenido en cromo (Cr) favorece mucho la resistencia a la corrosión del acero, así como da dureza y resistencia al desgaste. De este modo podemos decir que el acero inoxidable austenítico 316L es pasivo frente a la corrosión.

-El alto contenido en níquel (Ni) mejora la región de estabilidad de la austenita. También el manganeso (Mn) estabiliza la austenita.

-El contenido en molibdeno (Mo) favorece la resistencia a la oxidación.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen muchas aplicaciones debido a su elevada resistencia a la corrosión y a la oxidación. Aunque sin embargo estos aceros presentan dificultades para el mecanizado por sus propiedades específicas y su sensibilidad micro-estructural a las tensiones y deformaciones. Atendiendo a estas consideraciones, [E.M. Trent, 1991] sugiere un alto contenido de aleación de sulfuro para mejorar las condiciones de corte, y de este modo, la mejor maquinabilidad del acero se ve expresada en el comportamiento plástico de la zona de flujo del mecanizado.

La gama de aceros AISI 316 al ser aceros inoxidables austeníticos, poseen dificultades para el mecanizado. Estas dificultades para el mecanizado son debidas a la alta tracción del acero, a la elevada ductilidad y dureza, y a la baja conductividad térmica y la presencia de un comportamiento abrasivo. Además la influencia que producen en el acero los materiales aleados, como la elevada resistencia a la corrosión producida por el alto contenido de Cromo (Cr), o el contenido de Níquel (Ni) hacen que se alcancen elevadas tasas de endurecimiento.

Estas elevadas tasas de endurecimiento provocan elevadas fuerzas de corte y altas temperaturas al mecanizar esta gama de aceros. Además esta elevada dureza provoca un rápido desgaste de la herramienta que los mecaniza, así como una gran susceptibilidad al desgaste en entallas, dificultades con la ruptura de viruta, formación de BUE y un acabado final pobre.

Según [C.Maranhao, 2010] es por estas razones por las cuales se deben utilizar herramientas con recubrimiento cuando se trabaja con este tipo de aceros austeníticos inoxidables AISI 316. La dificultad para el mecanizado de este acero puede hacer que se tengan formaciones de viruta inestable y existan vibraciones



que provoquen modificaciones mecánicas y un comportamiento heterogéneo en la superficie que ha sido mecanizada. Debido a la baja conductividad térmica de este acero, es difícil que el calor provocado por el mecanizado se lo lleve la viruta y así por tanto provocará áreas de concentración de calor "hot points" en el material de trabajo. Estos aspectos afectan a la integridad de la pieza y llegan a provocar zonas con tensiones residuales en la misma según afirma [R.M'Saoubi, 2011].

[C.Maranhao, 2010] afirma que la máxima temperatura de corte que sufre la herramienta mecanizando el acero AISI 316 muestra un considerable incremento conforme se aumenta el avance por revolución, de tal manera que el daño térmico es mayor cuanto mayor es a su vez el avance por revolución de la herramienta, y por tanto se alcanzan mayores tensiones residuales. Esto se puede explicar por el hecho de que los aceros austeníticos tienen una baja conductividad térmica, es decir, tienden a concentrar calor, y por tanto la herramienta y la viruta son los principales mecanismos que evacúan el calor de la zona mecanizada.

Con respecto al acero AISI 316L se destaca la elevada resistencia a la corrosión y oxidación que posee y la bio-compatibilidad, que hace de este, un material muy usado en múltiples aplicaciones, como en el campo médico, como material usado para implantes, aunque una de sus desventajas es que es aún propenso a la corrosión por picaduras en ambientes corporales no conducentes [M. San-Juan, 2015]. Este material es también muy usado en aplicaciones industriales, como por ejemplo en la industria química, en aplicaciones criogénicas y en las estaciones nucleares, como en la construcción de prototipos de reactores, debido a sus elevadas propiedades mecánicas y su alta resistencia a la corrosión.

Es un material considerado difícil de mecanizar por sus propiedades específicas, tales como su alta sensibilidad mecánica y microestructural tanto a la deformación como a la distribución de tensiones. Es además propenso al fenómeno del endurecimiento en el mecanizado, lo que provoca modificaciones mecánicas y un comportamiento heterogéneo en la superficie mecanizada, trayendo consigo formaciones de viruta inestable y vibraciones durante el proceso de mecanizado.

Este acero AISI 316-L presenta una estructura cristalina austenítica, así como una buena resistencia a la temperatura, una elevada dureza y resistencia a la fluencia y una elevada resistencia a la fatiga por ciclo. Con respecto a la estructura que posee, muestra signos de trabajo realizado en frío como bandas de δ -ferrita orientadas claramente en la dirección del mecanizado y con la leve presencia de bandas de deslizamiento.



Una característica que le caracteriza es su baja conductividad térmica para el mecanizado, lo cual es un inconveniente, ya que provoca una mala evacuación del calor provocado por la punta de la herramienta que mecaniza, haciendo que localmente, se alcancen puntos de elevada tasa de calor "hot points".

Según [M.San-Juan, 2015] estos puntos de elevada tasa de calor tienen como consecuencia una alteración superficial en la pieza de trabajo, provocando un comportamiento no adecuado en la distribución de tensiones residuales y un comportamiento corrosivo en la pieza de trabajo. Estas tensiones residuales que se producen en el acero AISI 316L condicionan el corte ortogonal en aspectos como las fuerzas de corte, la morfología de la viruta o la distribución de temperaturas, por esta razón hay que tener muy cuenta estas tensiones residuales y tratar de minimizarlas lo máximo posible. Con estas consideraciones [R. M'Saoubi, 1999] aconseja herramientas de corte con recubrimiento de TiN para mejorar el proceso de mecanizado para un acero AISI 316L, así como añadir calcio (Ca) para mejorar la maquinabilidad del acero.

A continuación en la **Imagen 2**, **Imagen 3**, **Imagen 4** se pretende relacionar el aumento del avance por revolución de la herramienta con diferentes parámetros como: la temperatura alcanzada, la deformación plástica y la distribución de esfuerzos cortantes máximos, trabajando con un acero AISI 316.

En la siguiente Imagen 2 se muestra la influencia que tiene el aumento del avance por revolución de la herramienta con la temperatura alcanzada en un acero AISI 316:

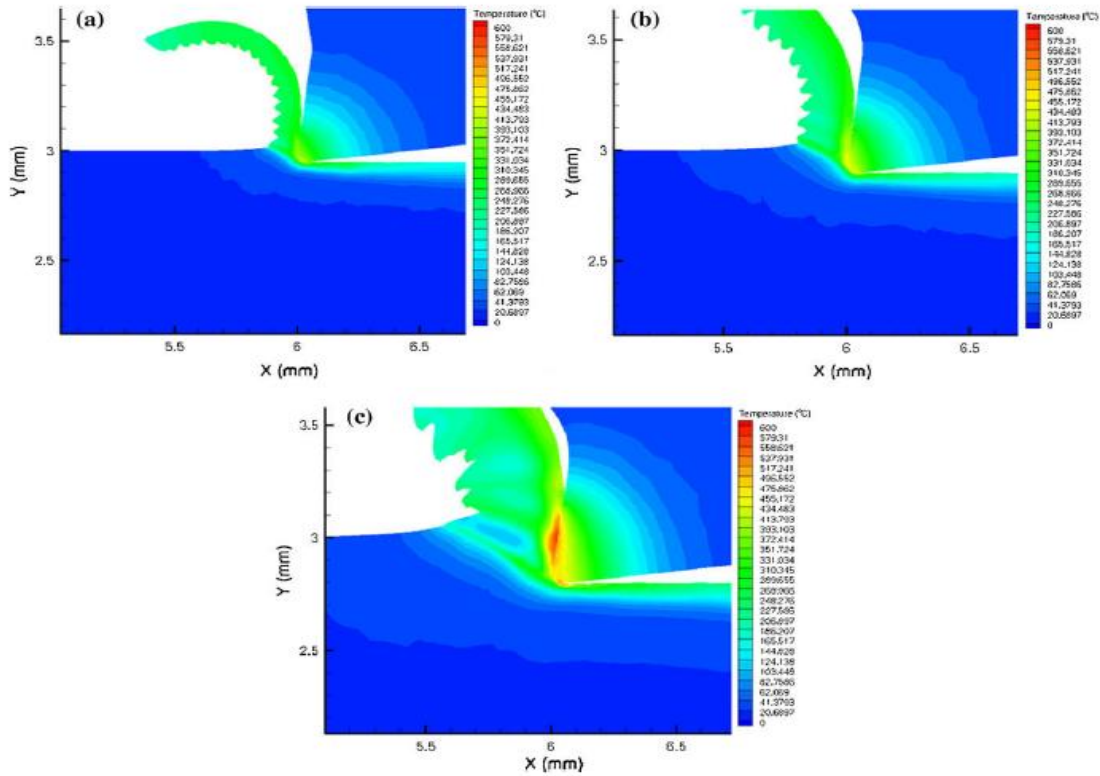


Imagen 2. Relación entre el aumento del avance por revolución y la temperatura alcanzada durante el mecanizado de un acero AISI 316. Fuente: [C.Maranhao, 2010]

En la siguiente Imagen 3 se muestra con una simulación, la deformación plástica que sufre la herramienta, el material mecanizado y la viruta, conforme se aumenta el avance por revolución de la herramienta en un acero AISI 316:

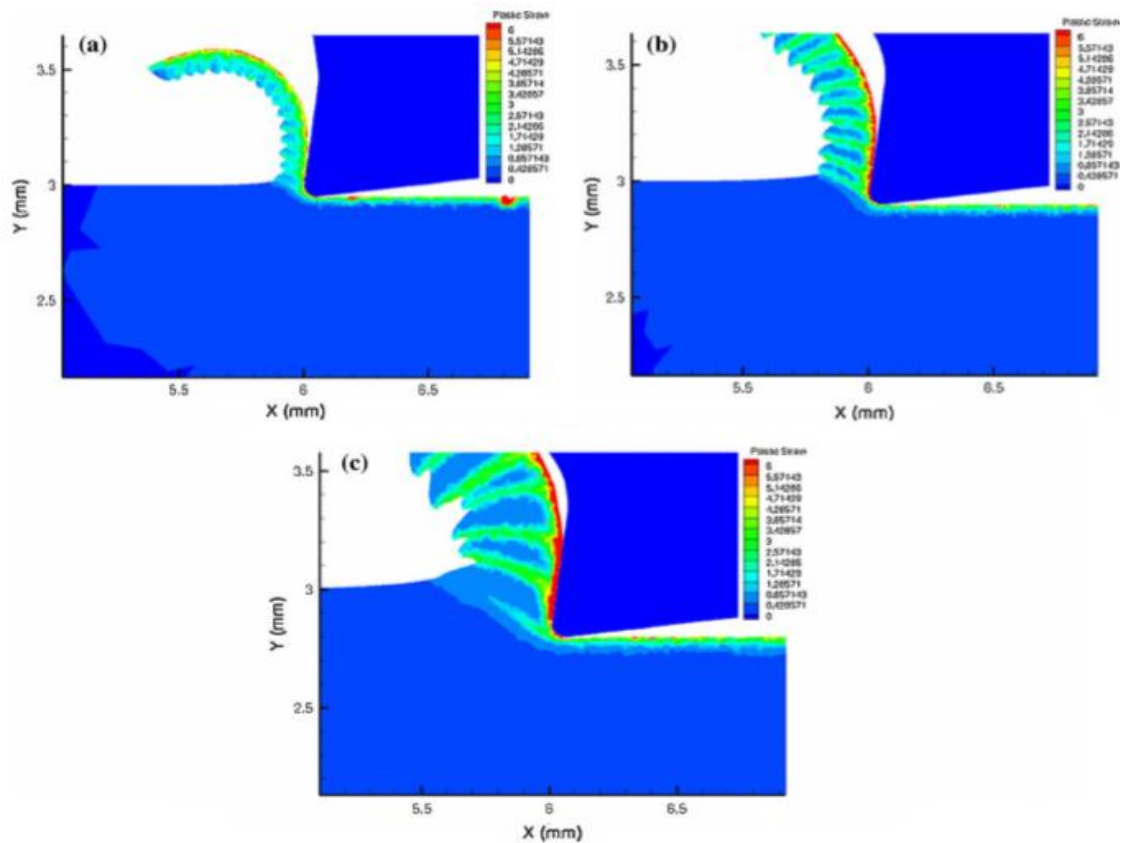


Imagen 3. Relación entre el aumento del avance por revolución y la deformación plástica durante el mecanizado de un acero AISI 316. Fuente: [C.Maranhao, 2010]

En la siguiente Imagen 4 se muestra con una simulación, la distribución de esfuerzos cortantes máximos que sufre la herramienta, el material mecanizado y la viruta, conforme se aumenta el avance por revolución de la herramienta en un acero AISI 316:

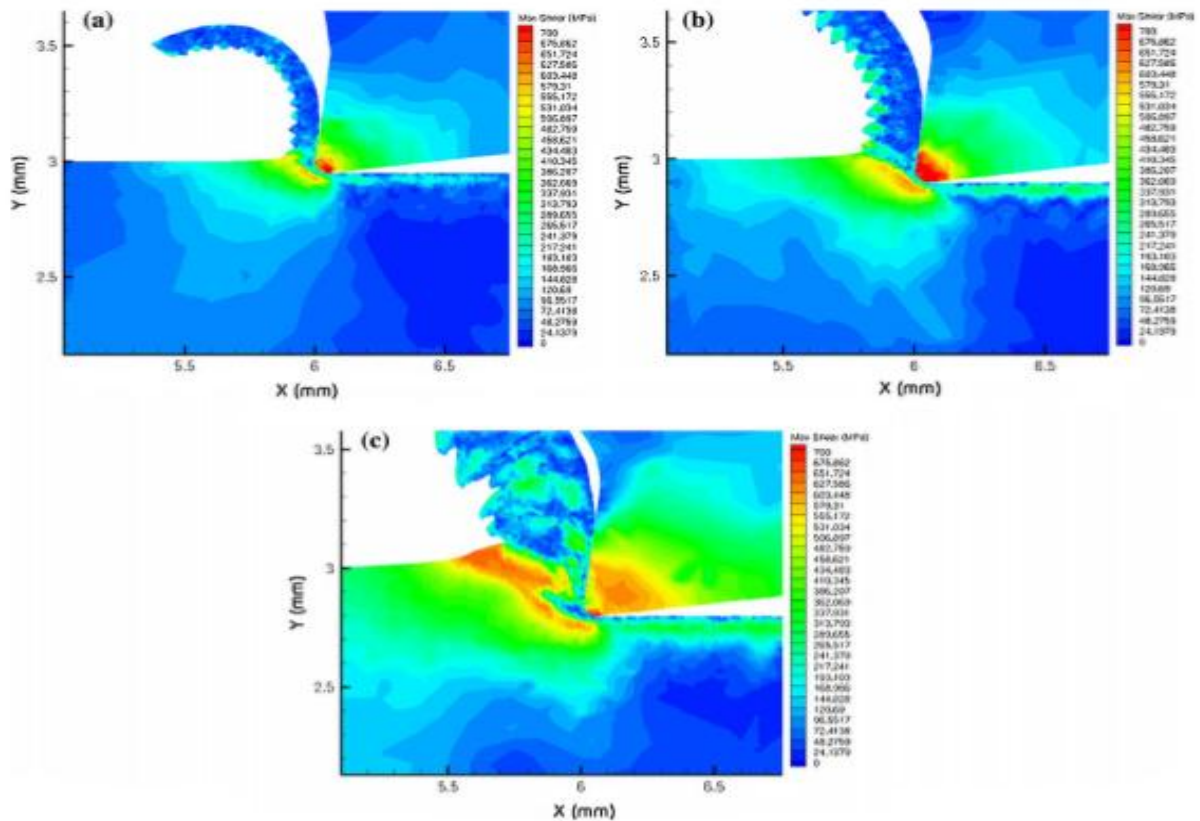


Imagen 4. Relación entre el aumento del avance por revolución y la distribución de esfuerzos cortantes máximos durante el mecanizado de un acero AISI 316. Fuente: [C.Maranhao, 2010]

En la siguiente **Imagen 5** se muestra la distribución de tensiones residuales conforme aumenta la profundidad del mecanizado en un acero AISI 316L, variando el radio del filo de la plaquita que mecaniza:

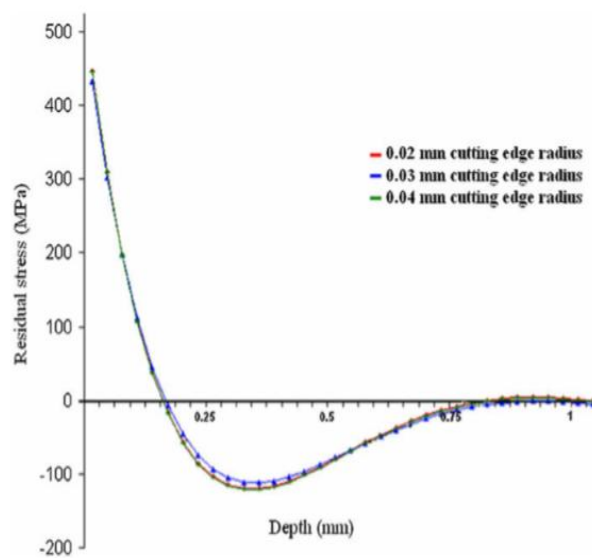


Imagen 5. Distribución de tensiones residuales conforme aumenta la profundidad del mecanizado en un acero AISI 316L, variando el radio del filo de la plaquita que mecaniza. Fuente: [C.Maranhao, 2010]

En la siguiente **Imagen 6** se muestra la distribución de tensiones residuales conforme aumenta la profundidad del mecanizado en un acero AISI 316L, variando el avance por revolución de la herramienta que mecaniza:

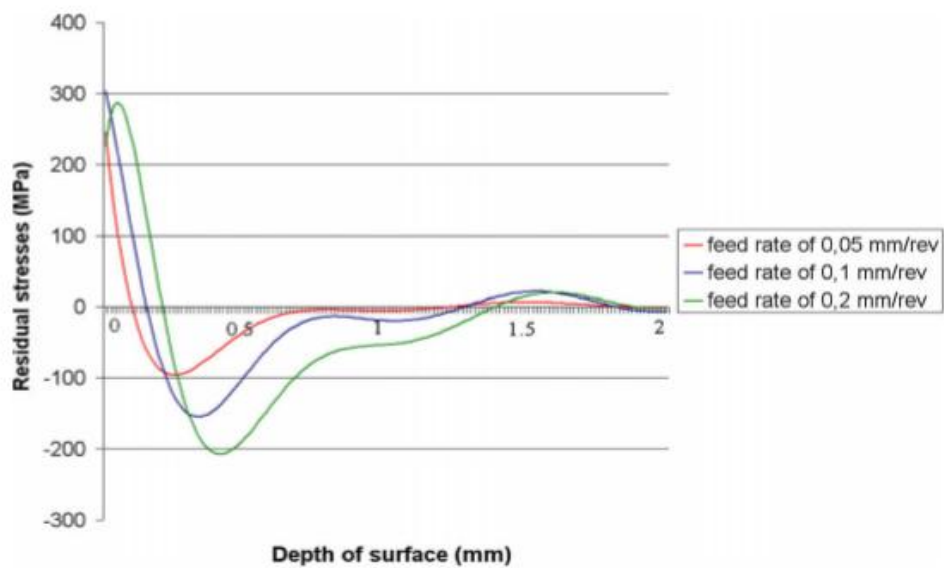


Imagen 6. Distribución de tensiones residuales conforme aumenta la profundidad del mecanizado en un acero AISI 316L, variando el avance por revolución de la herramienta que mecaniza.

Fuente: [C.Maranhao, 2010]



2.2. Características del proceso de fresado. Fresado en concordancia y en oposición

Empezamos por describir con una breve introducción el proceso de fresado en general, así como los tipos y características principales, para luego centrarnos en el tipo de fresado utilizado para la realización de este proyecto.

El fresado es un proceso de mecanizado por arranque de viruta que sirve para dar una morfología característica a la pieza. Para ello se utiliza una fresa, que se desplaza perpendicularmente a su eje de rotación al menos en una componente del movimiento de avance.

La característica más elemental de este tipo de mecanizado es que tanto la pieza que se va a mecanizar como la herramienta que realiza el corte, tienen un movimiento coordinado.

La herramienta gira a una velocidad n (rpm). La pieza se desplaza perpendicularmente al eje de rotación de la herramienta con una cierta velocidad de avance V_f (mm/min).

El tipo de movimiento de la herramienta y de la pieza de trabajo, así como el tipo de herramienta que se emplea, depende del mecanizado que se desea.

El fresado es un tipo de mecanizado muy polivalente, así algunas de las operaciones de fresado que existen, se recogen a continuación:

- Planeado
- Escuadrado
- Cajeado
- Fresado de forma
- Cajeado



- Cajeado helicoidal
- Planeado interrumpido
- Ranurado
- Fresado en penetración
- Corte de separación

Además, teniendo en cuenta la posición relativa del eje de la herramienta con respecto a la superficie de trabajo de la pieza, se distingue entre:

- Fresado cilíndrico
- Fresado frontal

También teniendo en cuenta las máquinas fresadoras, se puede clasificar en:

- Máquinas de fresado vertical
- Máquinas de fresado horizontal

Las partes de una máquina fresadora son las siguientes:

- Bancada**: Elemento que sustenta todo el conjunto.
- Columna**: Va montada sobre la base y soporta el resto de componentes.
- Carro**: Está situado en la columna y puede moverse de forma vertical respecto a esta.
- Mesa**: Sobre ella se sitúa la pieza fijándola a unas acanaladuras en forma de T invertida.



Se puede afirmar que el fresado es uno de los métodos de mecanizado más utilizados, debido a su:

- Alta eficiencia y precisión
- Buen acabado superficial
- Flexibilidad de trabajo

Algunos de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el fresado son:

- La elección del tipo de fresa, así como del tipo de placa y filos que van a realizar el mecanizado.
- La velocidad de corte (m/min)
- Velocidad de giro del husillo (rev/min)
- Diámetro de la fresa
- Profundidad de pasada
- Sistema de fijación de la pieza que va a ser mecanizada
- Material de la pieza a mecanizar
- Sistema de refrigeración
- Avance de la mesa (mm/min)
- Avance por revolución de la herramienta (mm/rev)
- Material de las plaquitas y forma de mecanizar de las mismas
- Elección de rompe-virutas o no de la plaquita

A partir de ahora nos centraremos en describir el tipo de fresado utilizado para la realización de este proyecto, así como las características principales del mismo.

La máquina fresadora utilizada es una máquina de fresado vertical, ya que la herramienta es accionada por el husillo principal con su eje de giro en posición vertical. En el apartado 3 "Cadena de Medida" se tratará más profundamente sobre las características de los equipos empleados para la realización de este proyecto.

La operación de fresado que ha sido realizada en estos ensayos es un ranurado recto, utilizando una sola placa que es la que realiza el arranque de viruta del material utilizado (acero AISI 316-L ASS).

Se trata de un fresado lateral ya que la fresa maquina el lado de una sola superficie de trabajo.

El proceso de mecanizado que es utilizado para este estudio de fuerzas y parámetros de corte es un fresado ortogonal o tangencial.

La principal característica de este tipo de fresado es que el eje de la fresa está situado paralelamente a la superficie de trabajo de la pieza, entrando en acción la parte cilíndrica de la herramienta.

También cabe destacar para el fresado tangencial que el avance es perpendicular al eje de giro, la profundidad de corte es en dirección radial y el corte es producido por los filos periféricos.

En la siguiente **Imagen 7** tomada en el laboratorio de fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales, se muestra la metodología seguida para este tipo de fresado en los ensayos.



Imagen 7. Fresado cilíndrico o tangencial

Teniendo en cuenta el avance de la fresa y refiriéndose al fresado cilíndrico, se distingue entre:

- Fresado en oposición (UP milling)
- Fresado en concordancia (DOWN milling)

Las características de cada uno de los dos tipos de fresado se detallan a continuación:

-Fresado en oposición ("Up milling"):

El máximo grosor de la viruta se encuentra al final del corte. El sentido del avance es el opuesto al sentido de rotación de la herramienta, tal y como se puede observar en la **Imagen 8** mostrada a continuación:

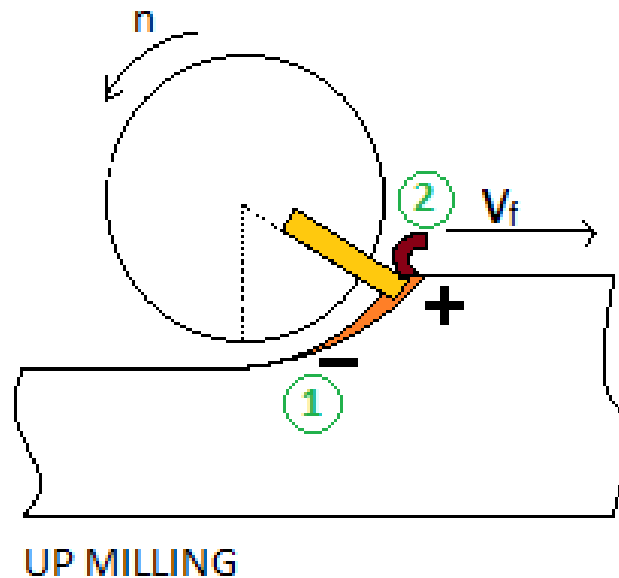


Imagen 8. Fresado en oposición ("UP milling")



Las características principales del fresado en oposición (Up milling) son:

- El espesor de la viruta al que se enfrenta cada filo aumenta progresivamente, y es máximo al separarse el diente de la fresa.
- El esfuerzo también aumenta paulatinamente con lo que no se producen vibraciones.
- Debido al rozamiento, se produce un consumo de energía improductiva importante.
- Se produce un mayor calentamiento.
- Se acelera el desgaste de la herramienta.
- El empuje inicial de la herramienta sobre la pieza genera deformaciones plásticas locales: endurecimiento y aparición de tensiones superficiales.
- La fresa tiende a arrastrar y a levantar la pieza.

A continuación se señalan los pros y contras de este método de fresado en oposición (Up milling):

Pros:

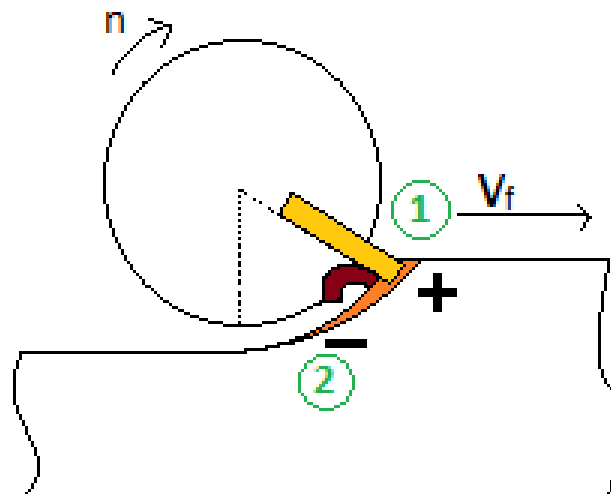
- 1) La cantidad de material cortado por diente no va en función de las características de la superficie de la pieza de trabajo.
- 2) El hecho de que la superficie de trabajo sea escalada no afecta a la vida de la herramienta.
- 3) El proceso de corte es suave siempre y cuando los labios estén afilados.

Contras:

- 1) Los dientes de la fresa tienen tendencia a realizar pequeñas vibraciones.
- 2) La pieza de trabajo tiene tendencia a levantarse, de este modo es importante una apropiada sujeción de dicha pieza de trabajo.
- 3) Rápido desgaste de la herramienta comparado con el fresado en concordancia (Down milling)
- 4) Las virutas caen enfrente de la fresa. Esta disposición dificulta la operación.
- 5) Tiende a aumentar la fuerza para levantar la pieza de trabajo.
- 6) Se requiere más potencia debido a un incremento de la fricción causado por la viruta.
- 7) Acabado superficial estropeado debido al aumento de viruta arrastrada por diente.

-Fresado en concordancia ("Down milling"):

El máximo grosor de la viruta se encuentra al inicio del corte. El sentido del avance es el mismo que el sentido de rotación de la herramienta, tal y como se puede observar en la **Imagen 9** mostrada a continuación:



DOWN MILLING

Imagen 9. Fresado en concordancia ("DOWN milling")



Las características principales del fresado en concordancia ("Down milling") son:

- El espesor de viruta es máximo al entrar en contacto sobre la pieza.
- Aparición de impactos, consecuencia de lo anterior.
- Son necesarios, para el riesgo de rupturas, dientes tenaces.
- Se favorece el movimiento de avance.
- Menores huellas de mecanizado.
- La fuerza de corte aprieta o sujeta la pieza contra la mesa, (es la forma de fresar láminas muy delgadas).
- Elevadas vibraciones.

A continuación se señala los pros y contras de este método de fresado en concordancia:

Pros:

- 1) Disminución de la componente de las fuerzas de corte en la sujeción de la pieza de trabajo, particularmente en las partes delgadas.
- 2) Fácil disposición de la viruta. La viruta cae detrás de la fresa.
- 3) Menos desgaste. Incremento de la vida de la herramienta en un 50%.
- 4) Mejora del acabado superficial. Menos viruta arrastrada por diente.
- 5) Se requiere menos potencia que en el fresado en oposición. Pueden usarse fresas con un gran ángulo.
- 6) El fresado en concordancia se ejerce menos fuerzas en la pieza de trabajo que en el fresado en oposición. Los elementos son más simples y menos costosos.

Contras:

- 1) Debido al alto resultado de las fuerzas de impacto cuando el diente establece contacto con la pieza de trabajo, esta operación debe tener una configuración rígida, y la violenta reacción debe ser eliminada con el avance del mecanismo.
- 2) El fresado en concordancia no es apropiado para piezas que tienen un escalado, ni en metales con una alta generación de temperatura en el trabajo, como fundiciones y metales forjados. El escalonado de la pieza de trabajo hace que la operación sea dura y abrasiva, causando un desgaste y un daño excesivos en los dientes de la fresa, provocando así la disminución de la vida de la herramienta.

[Peter Michalik, 2014] estudia la rugosidad que se obtiene con ambos métodos para el fresado de un acero C45, y comparando los valores de la rugosidad superficial R_z , obtiene que el fresado en concordancia tiene un mejor acabado superficial que el fresado en oposición.

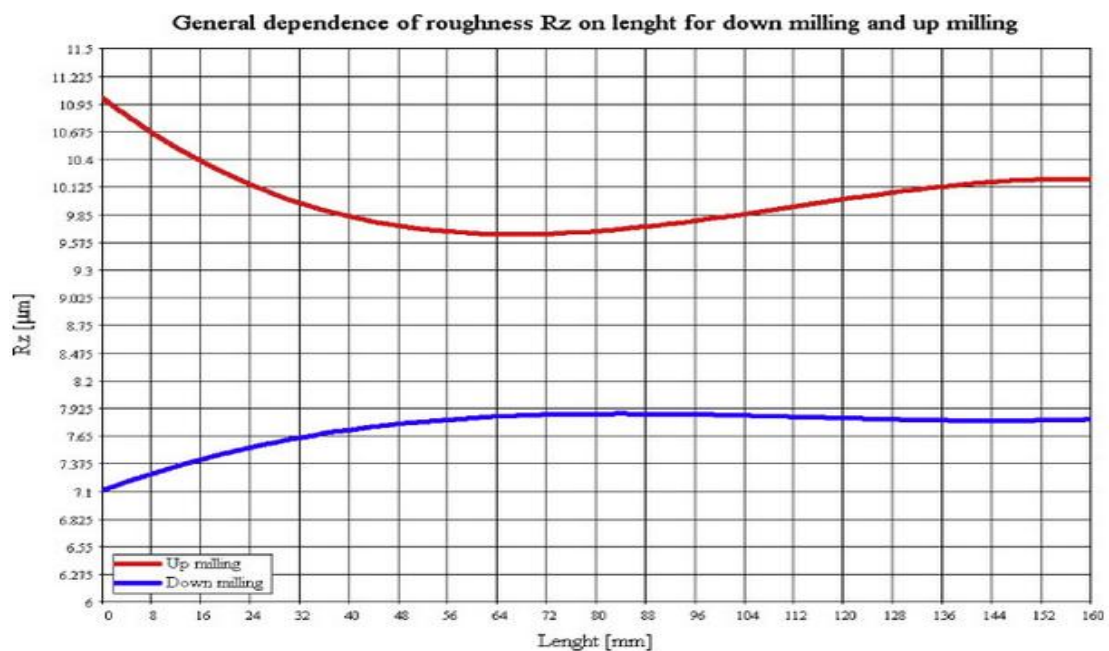


Imagen 10. Comparación de rugosidades entre fresado en concordancia y fresado en oposición. Fuente: [Peter Michalik, 2014]



Para caracterizar el proceso de fresado se definen unos parámetros que se han de tener en cuenta:

-Velocidad de corte eficaz o verdadera: Se expresa en (m/min). Indica la velocidad superficial en el diámetro y supone un valor básico para calcular los datos de corte.

Este parámetro tiene que ser elegido antes de comenzar el mecanizado, y su valor es función de factores como la maquinabilidad del tipo de material que va a ser fresado o la velocidad recomendada por el fabricante de la plaquita o plaquitas que monta la fresa, entre otros.

A partir de la determinación de la velocidad de corte se puede determinar la velocidad de rotación que debe tener el husillo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_c \left(\frac{m}{min} \right) = \frac{n (min^{-1}) \times \pi \times D_c (mm)}{1000 (mm/m)}$$

Donde V_c es la velocidad de corte eficaz, n es la velocidad de giro del husillo, D_c es el diámetro de la herramienta.

La velocidad de corte es el factor principal que determina la duración de la herramienta. Así pues una velocidad de corte elevada permite realizar en un tiempo menor el mecanizado pero acelera el desgaste sufrido en la herramienta.

A continuación se indican algunos de los inconvenientes de las velocidades de corte excesivas y en su contra, las velocidades de corte demasiado bajas.



La velocidad de corte excesiva puede dar lugar a:

- Desgaste muy rápido del filo de corte de la herramienta.
- Deformación plástica del filo de corte con pérdida de tolerancia en el mecanizado.
- Calidad del mecanizado deficiente.

La velocidad de corte demasiado baja puede dar lugar a:

- Formación de filo de aportación (BUE) en la herramienta.
- Efecto negativo sobre la evacuación de viruta.
- Baja productividad.
- Coste elevado del mecanizado.

- **Velocidad de rotación de la fresa:** Se expresa en rpm ($\frac{rev}{min}$).

Se define como el número de revoluciones que realiza la herramienta de fresado sobre el husillo en cada minuto.

Este es un valor orientado a la máquina, que se calcula a partir del valor de velocidad de corte recomendado para una operación.

$$n \text{ (min}^{-1}\text{)} = \frac{V_c \left(\frac{m}{min} \right) \times 1000 \left(\frac{mm}{m} \right)}{\pi \times D_c \text{ (mm)}}$$

Una vez calculado este valor de rotación de la fresa, se calcula la velocidad de corte eficaz o verdadera.



- **Velocidad de avance:** Se expresa en ($\frac{mm}{min}$). Se conoce también como avance de mesa o avance de máquina.

Representa el desplazamiento de la herramienta respecto a la pieza, en función del avance por diente y del número de dientes de la fresa.

La expresión para determinar la velocidad de avance es la que se expresa a continuación:

$$f \left(\frac{mm}{min} \right) = f_n \left(\frac{mm}{rev} \right) \times n \left(\frac{rev}{min} \right)$$

Donde f es la velocidad de avance, f_n es el avance por revolución, n es el régimen de giro con el que gira la fresa.

Al igual que la velocidad de rotación de la herramienta, en las máquinas convencionales la velocidad de avance se selecciona a partir de una gama de velocidades disponibles, mientras que las máquinas de control numérico pueden trabajar con cualquier velocidad de avance hasta la máxima velocidad de avance de la máquina.

A continuación se citan algunas de las consecuencias que presenta tener una velocidad de avance excesiva:

- Buen control de viruta
- Menor tiempo de corte
- Menor desgaste de la herramienta
- Riesgo más alto de rotura de la herramienta
- Elevada rugosidad superficial del mecanizado



Una velocidad de avance baja por su contra da lugar a:

- Viruta más larga
- Mejora de la calidad del mecanizado
- Desgaste acelerado de la herramienta
- Mayor duración del tiempo de mecanizado
- Mayor coste del mecanizado

- **Avance por revolución:** Se expresa en ($\frac{mm}{rev}$).

Es un valor auxiliar que indica hasta dónde se desplaza la herramienta durante una rotación completa.

Se utiliza para cálculos de avance y a menudo para determinar la capacidad de acabado de una fresa.

- **Tiempo de mecanizado:** Se expresa en minutos (min).

Se calcula atendiendo a la siguiente fórmula:

$$T_c (\text{min}) = \frac{l_m (\text{mm})}{f (\text{mm}/\text{min})}$$

Donde T_c es el tiempo de mecanizado, l_m es la longitud mecanizada, f es la velocidad de avance o velocidad de avance de la mesa.

- **Volumen de arranque de viruta:** Se expresa en $(\frac{cm^3}{min})$.

Se define como el volumen de material eliminado.

Se establece utilizando los valores de anchura, profundidad de corte y avance con la siguiente expresión:

$$Q \left(\frac{cm^3}{min} \right) = \frac{A_c (mm) \times a_p (mm) \times f (mm/min)}{1000 (mm^3/cm^3)}$$

Donde Q es el volumen de viruta arrancado, A_c es el ancho del corte (en el caso de fresado es el diámetro de la herramienta), a_p es la profundidad de pasada, f es la velocidad de avance.

- **Espesor medio de la viruta:** Se expresa en (mm).

Es un valor útil para determinar la fuerza de corte específica, se utiliza para el cálculo de la potencia neta.

Se puede observar de manera visual en la siguiente **Imagen 11** mostrada a continuación:

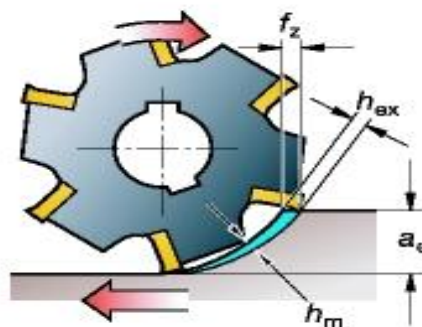


Imagen 11. Espesor medio de viruta.
Representado por h_m



Cuanto menor sea el espesor de viruta en el momento de arranque, la carga del filo será menor y esto permitirá aplicar mayores velocidades de avance sin dañar la herramienta.

- **Fuerza de corte específica:** Se expresa en $(\frac{N}{mm^2})$.

Es un factor utilizado para el cálculo de la potencia.

La fuerza de corte específica depende de la resistencia del material con un valor de espesor de viruta concreto.

Es un parámetro necesario a tener en cuenta para evitar roturas y deformaciones en la herramienta y en la pieza; y para poder calcular la potencia necesaria para efectuar un determinado mecanizado.

- **Profundidad de corte o de pasada:** Se expresa en (mm).

Se define como la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta.

- **Potencia de corte:** Se expresa en (kW).

La potencia de corte P_c necesaria para efectuar un determinado mecanizado se calcula a partir del valor del volumen de arranque de viruta, la fuerza de corte específica y el rendimiento que tenga la fresadora.

Es un valor orientado a la máquina-herramienta, que ayuda a calcular la potencia neta y así garantizar que la máquina pueda manejar la fresa y la operación.

Para obtener la potencia de corte real de la máquina, se ha de tener en cuenta la eficiencia de la máquina.

La eficiencia de la máquina expresa el porcentaje de la potencia del motor que está disponible en la herramienta puesta en el husillo.



Para calcular la potencia de corte se utiliza la siguiente expresión:

$$P_c \text{ (kW)} = \frac{A_c \text{ (mm)} \times a_p \text{ (mm)} \times f \text{ (mm/min)} \times F_c \text{ (kgf/mm}^2\text{)}}{6120000 \times \eta}$$

Donde P_c es la potencia de corte, A_c es el ancho de la herramienta, a_p es la profundidad por pasada, f es la velocidad de avance, F_c es la fuerza específica de corte, η es el rendimiento o eficiencia de la máquina.

La potencia de corte P_c también se puede calcular como el resultado de multiplicar la velocidad de corte y la fuerza de corte. Se expresa a continuación:

$$P_c \text{ (W)} = \frac{F_c \text{ (N)} \times V_c \text{ (m/min)}}{60 \text{ (s/min)}}$$

La potencia necesaria de la máquina dependerá de la eficiencia de la fresadora:

$$P_{MH} \text{ (W)} = \frac{P_c \text{ (W)}}{\eta}$$

A continuación se muestra una serie de tablas donde se presentan valores preestablecidos y orientativos para un fresado.

En la siguiente **Tabla 2** se muestran los valores de Dureza (HB) y Fuerza de Corte F_c (kgf/mm^2) para el mecanizado de diferentes materiales.

Tipos de material		Dureza HB	f_c
			kgf/mm^2
Acero al carbono,	C 0,15 %	125	275
	C 0,35 %	150	300
	C 0,70 %	250	330
Aceros baja aleación,	recocido	125 - 200	320
	templado	200 - 450	390
Aceros alta aleación,	recocido	150 - 250	350
	templado	250 - 500	410
Aceros inoxidables,	ferríticos	175 - 225	360
	austeníticos	150 - 200	390
Acero fundido,	no aleado	225	260
	baja aleación	150 - 250	280
	alta aleación	150 - 300	320
Acero extra duro		> 50 HRC	675
Fundición maleable,	viruta corta	110 - 145	220
	viruta larga	200 - 250	200
Fundición gris,	poco dúctil	150 - 225	140
	muy dúctil y aleada	200 - 300	180
Fundición nodular (tenaz)	ferrítica	125 - 200	150
	perlítica	200 - 300	225
Fundición en coquilla		40-60 HRC	475

Tabla 2. Fuerzas específicas de corte y durezas para fresado



En la siguiente **Tabla 3** se muestra el valor de la Velocidad de Corte V_c (m/min) en función del régimen de giro n y del diámetro de la fresa D :

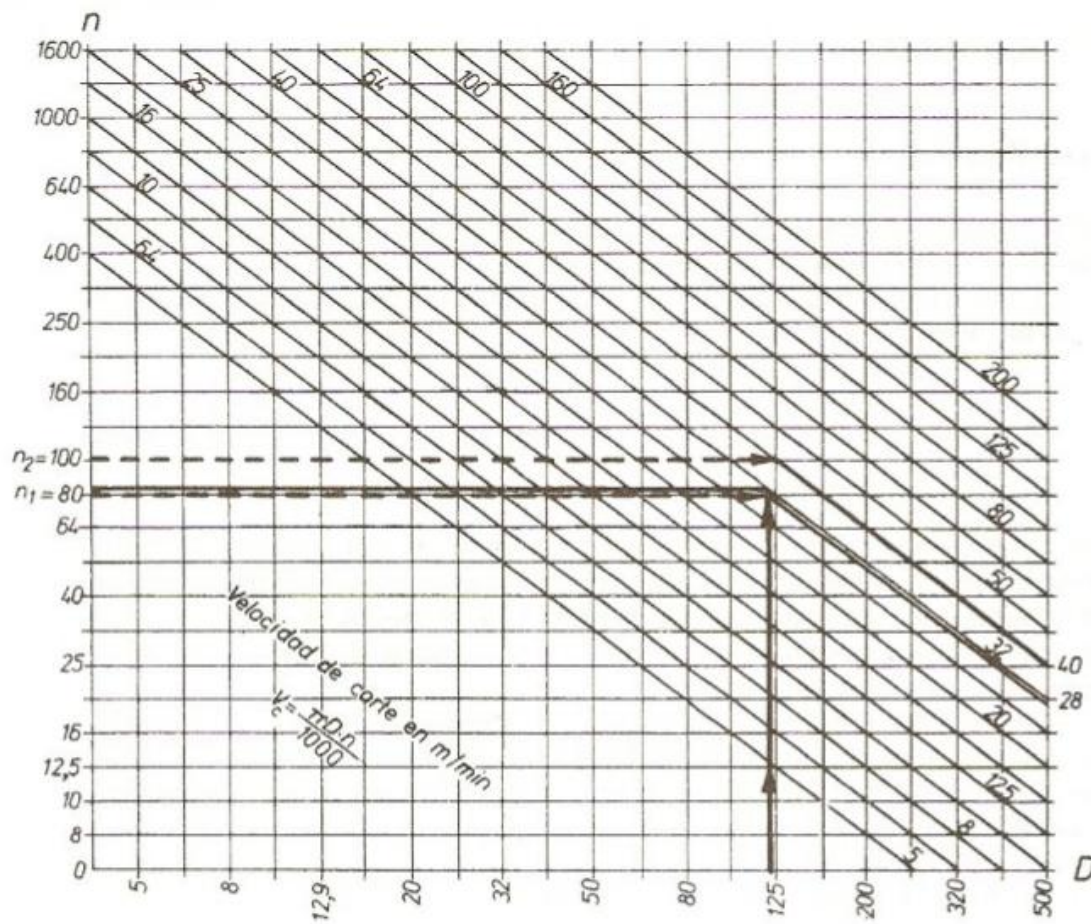


Tabla 3. Tabla de velocidades de corte en un fresado

En la siguiente **Tabla 4** se muestra el valor de la Velocidad de Corte V_c (m/min) y la velocidad de avance f (mm/min) en función del material con el que se trabaja y de la profundidad del fresado:

Material que se trabaja	Acabado		Desbastado			
	Profundidad del fresado hasta $p = 1$ mm		Profundidad del fresado hasta $p = 5$ mm		Profundidad del fresado hasta $p = 8$ mm	
	V_c	F	V_c	F	V_c	F
<i>Fresas cilíndricas HSS ancho de fresado hasta 100 mm</i>						
Acero de aleación mejorado hasta 100 kgf/mm ²	10 ... 14	35 ... 45	10 ... 12	45 ... 70	8 ... 10	25 ... 35
Acero de aleación recocido hasta 75 kgf/mm ²	14 ... 18	45 ... 70	12 ... 14	70 ... 100	10 ... 12	40 ... 60
Acero no aleado hasta 70 kgf/mm ²	18 ... 22	60 ... 90	16 ... 18	90 ... 150	12 ... 14	60 ... 80
Fundición hasta 180 Brinell ...	14 ... 18	70 ... 100	12 ... 14	100 ... 170	10 ... 12	70 ... 100
Metales ligeros	200 ... 300	100 ... 150	150 ... 250	150 ... 300	150 ... 200	90 ... 150
Latón	40 ... 60	100 ... 160	30 ... 40	160 ... 220	30 ... 40	100 ... 150

Tabla 4. Tabla de profundidad del fresado

Ahora se va describir brevemente con dos imágenes las fuerzas presentes en los dos tipos de fresado cilíndrico según el avance de la fresa, como son el fresado en concordancia y el fresado en oposición (Up-milling).

Las fuerzas que más nos interesan son la fuerza de corte F_c que se representa en la **Imagen 12** en color amarillo, y la fuerza radial o tangencial F_t representada en color verde.

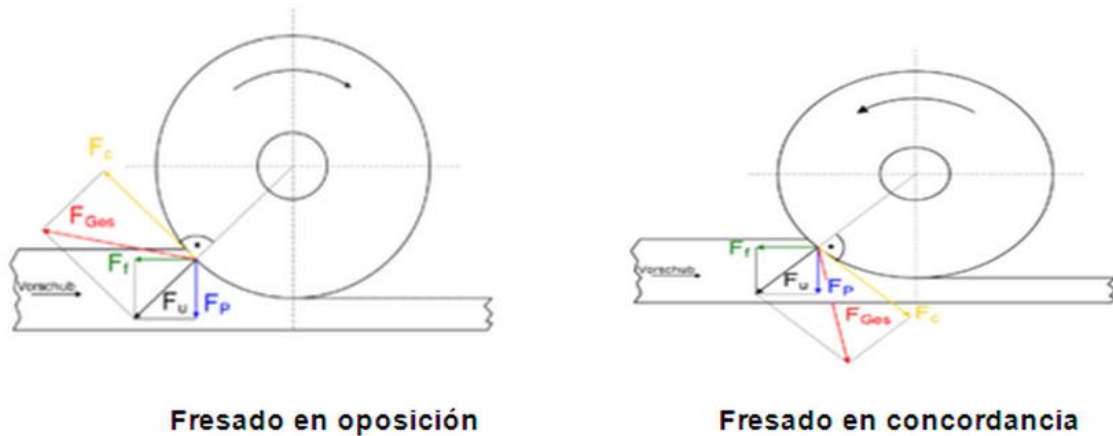
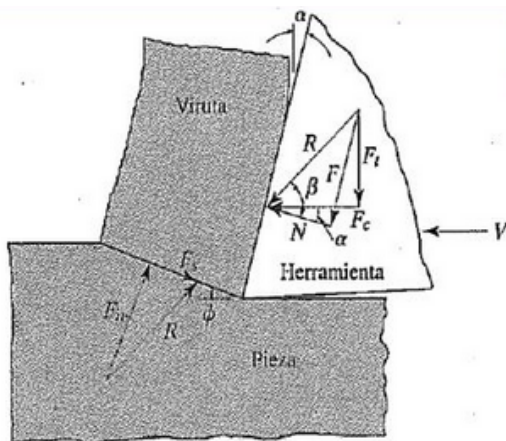


Imagen 12. Representación de las fuerzas en fresado en oposición y en concordancia

A continuación se representa con la siguiente **Imagen 13**, el conjunto de las fuerzas que intervienen en un proceso de fresado cilíndrico como el estudiado:



Fuerzas sobre la herramienta:

$F_c \equiv$ fuerza de corte

$F_t \equiv$ fuerza de empuje

Sobre la cara de la herramienta:

$F \equiv$ fuerza de fricción

$N \equiv$ fuerza de normal

En el plano cortante:

$F_s \equiv$ fuerza de cizallamiento

$F_n \equiv$ fuerza de normal

Imagen 13. Fuerzas de corte en un fresado cilíndrico



Con el uso de un dinamómetro montado en la herramienta o en la pieza, se puede caracterizar el proceso de mecanizado. Si se instala un dinamómetro en la herramienta que realiza el fresado, se puede determinar la fuerzas de corte y la fuerza radial o de empuje.

Una expresión para calcular la fuerza de empuje F_t , es la siguiente:

$$F_t = F_c \times \tan(\beta - \alpha)$$

La fuerza tangencial es importante para que el portaherramientas, los sistemas de sujeción y la máquina-herramienta sean lo suficientemente rígidos para soportar deflexiones mínimas.

Además, según las condiciones de trabajo, podría ser negativa esta fuerza tangencial o positiva, en función de si empuja hacia arriba o empuja hacia abajo respectivamente.

Se tendría $\beta < \alpha$, con:

- Grandes ángulos de desprendimiento.
- Baja fricción en la interfaz herramienta-viruta.
- En ambos casos.

También se puede establecer que:

La relación de F a N es el coeficiente de fricción, μ y se calcula como:

$$\mu = \frac{F}{N}$$



La tensión cortante τ_s y la tensión normal σ_s en el plano de cizallamiento, se calculan como:

$$\tau_s = \frac{F_s}{A_s}$$

$$\sigma_s = \frac{F_n}{A_s}$$

Siendo A_s el área del plano de cizallamiento.

Y además no sólo tenemos la potencia de corte (expresada anteriormente) sino que también existen y se pueden calcular, la potencia de cizallamiento y la potencia de fricción, actuando ambas respectivamente en la zona de cizallamiento y en la cara de desprendimiento de la herramienta.

La potencia de cizallamiento:

$$P_s = F_s \times V_s$$

La potencia de fricción:

$$P_f = F \times V_c$$

De este modo, calculando ambas potencias en el plano de cizallamiento y de desprendimiento de la herramienta, podemos llegar también a obtener la potencia de corte:

$$P = P_f + P_s$$

2.3. Características de la plaquita utilizada y los parámetros del mecanizado

La placa que ha sido utilizada para el fresado del acero AISI 316L ASS, es una placa de tres filos, sin rompe-virutas y con los siguientes ángulos característicos en el proceso de mecanizado:

- Ángulo de corte: 90°
- Ángulo de ataque principal: 0°
- Ángulo de ataque axial: 0°
- Ángulo radial de ataque: 0°

En la siguiente **Imagen 14**, se pueden observar algunos de los ángulos de mecanizado de la plaquita:

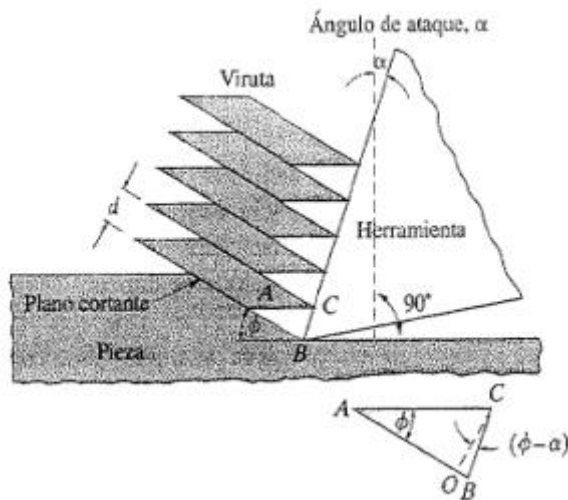
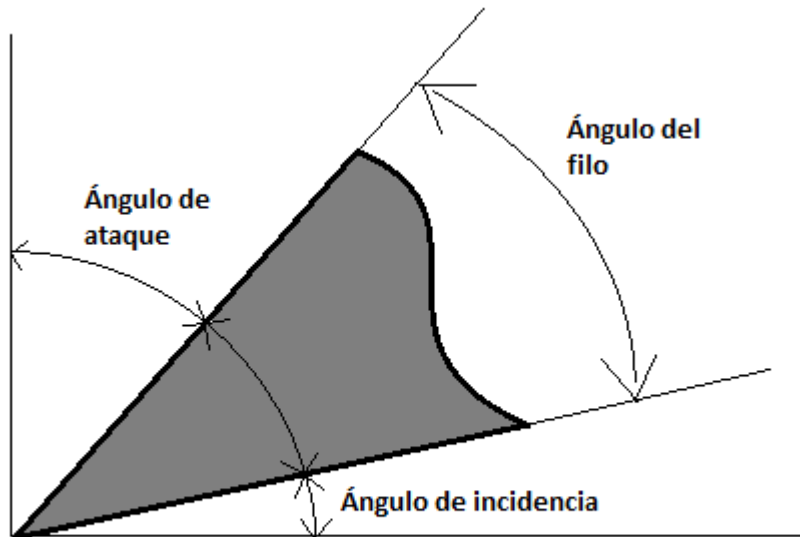


Imagen 14. Ángulos de la herramienta en el mecanizado

En la siguiente **Imagen 15** se observa con mayor claridad los ángulos principales que actúan en el proceso de corte:



$$\text{Ángulo de ataque} + \text{Ángulo de incidencia} + \text{Ángulo del filo} = 90^\circ$$

Imagen 15. Ángulos de corte en el mecanizado

La importancia y efectos de la elección de estos ángulos se explican a continuación

Con un ángulo de incidencia pequeño, algunas de las consecuencias son:

- La cuchilla no penetra adecuadamente.
- La cuchilla roza, con lo que se produce calor y un posterior desafilado de la herramienta utilizada en el mecanizado.

Con un ángulo de incidencia grande, los efectos podrían ser:

- Filo frágil.
- Desmoronamiento del filo.



Un factor a tener en cuenta debe ser que cuanto más grande sea el material a mecanizar, menor debe ser el ángulo de incidencia.

Con respecto al ángulo de ataque o también conocido como ángulo de desprendimiento de la viruta, mostrado en la **Imagen 16**, se realizan las siguientes consideraciones:

- El esfuerzo es normal a la cara de desprendimiento (como se puede apreciar en la **Imagen 16**).
- Cuanto mayor sea el ángulo de ataque, las fuerzas actúan sobre una sección menor del filo.
- Si el material de la herramienta es poco resistente, el ángulo de ataque debe ser pequeño.

Con respecto al material para el ángulo de ataque se tienen las siguientes consideraciones:

- Para material duro: El ángulo de ataque ha de ser pequeño, debido a que hay un mayor esfuerzo.
- Para material blando: Ángulo de ataque ha de ser grande, debido a que se produce un menor esfuerzo en la cara de desprendimiento.

Además se recomienda que el ángulo de ataque o de desprendimiento de la viruta con el que se trabaja, sea el mayor posible sin que se pueda desmoronar la herramienta, ya que también, cuanto mayor sea el ángulo de ataque, mejor es el desprendimiento de la viruta y mejor es el acabado de la pieza, y también a mayor ángulo de ataque, menor ángulo de doblado de la viruta.

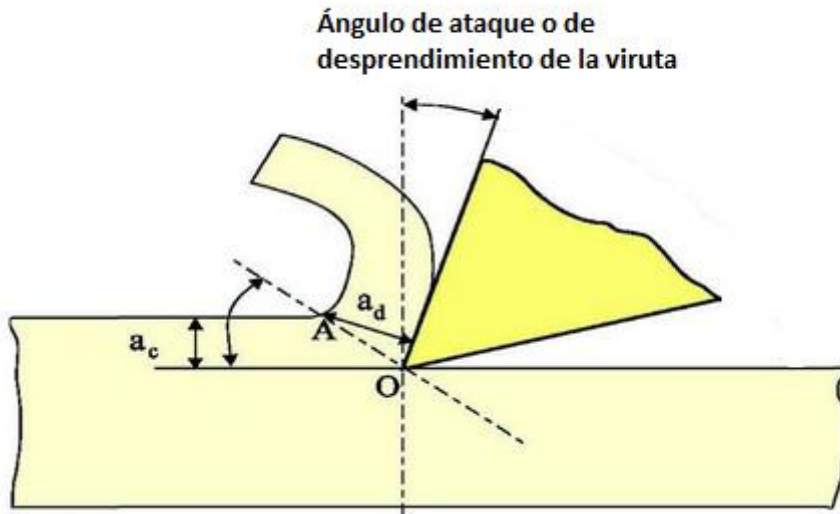


Imagen 16. Ángulo de ataque o de desprendimiento de la viruta

El avance de la fresa influye en gran medida en el ángulo de ataque, de tal modo que cuanto mayor es el avance, la viruta es más gruesa, mayores son los esfuerzos, y por tanto menor es el ángulo de desprendimiento.

Existe una tabla con los valores recomendados para los ángulos de ataque, según el material que se va a mecanizar y el tipo de material de la herramienta.

Se exponen estos datos en la siguiente **Tabla 5**:

Material de la pieza	Material de la herramienta	
	Acero rápido	Metal duro
Magnesio	25° - 35°	15° - 25°
Bronce de manganeso	10° - 16°	4° - 10°
Bronce de aluminio	15° - 20°	6° - 12°
Aluminio fundido	20° - 30°	10° - 20°
Bronce fosforoso	4° - 6°	0° - 4°
Cobre	20° - 30°	10° - 20°
Acero inoxidable	5° - 12°	0° - 5°
Acero al cromo vanadio	8° - 14°	3° - 7°
Acero al níquel (3.5 % Ni)	10° - 15°	4° - 8°
Acero al carbono (1 % de C)	10° - 15°	4° - 8°
Acero al carbono (0.4 % C)	12° - 20°	6° - 12°
Acero al carbono (0.2 % C)	15° - 25°	8° - 15°
Fundición aleada	10° - 15°	5° - 10°
Fundición maleable	10° - 15°	5° - 10°
Fundición en coquilla	3° + 5°	10° - 0°
Fundición dura (400 Brinell)	5° - 10°	0° - 5°
Fundición media (250 Brinell)	10° - 15°	4° - 9°
Fundición blanda (170 Brinell)	12° - 8°	6° - 12°

Tabla 5. Valores recomendados para los ángulos de desprendimiento

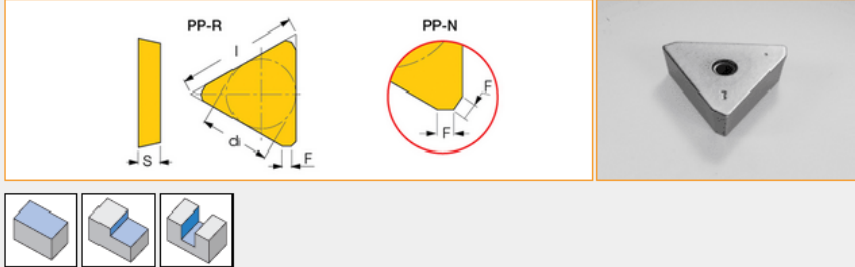
Ahora nos centramos en la descripción de la plaquita utilizada en este estudio:

La plaquita utilizada en este proyecto tiene la denominación:

TPKN 1603 PPTR-42 IC328

Es de la marca comercial "Iscar Tools", y se muestra en la siguiente **Imagen 17** extraída de la página web de "Iscar Tools":

Milling Family : [TPKN/TPKR](#) General use milling inserts. The -42 design has an improved tool life. The -HS has a serrated cutting edge for chip splitting and reduced chatter, the -76 has ribs along the cutting edge for reduced heat transfer in heavy machining. Designation : TPKN 1603PPTR-42



di	l	S	F	fz(min)	fz(max)
9.52	16.50	3.18	1.47	0.10	0.15




Catalog No	Grade & Vc	Alternative	Primary View File(2D)	Model (3D)
5600931 	IC50M	Alternative	DXF	Not Available 3D Required
5600969 	IC250	Alternative	DXF	Not Available 3D Required
5601315 	IC328		DXF	Not Available 3D Required

Imagen 17. Plaquita de corte con denominación: TPKN 1603 PPTR-42 IC328

La plaquita se ha elegido atendiendo a una serie de criterios y consideraciones técnicas, entre las que destacan las siguientes:

Para obtener un buen control de la viruta, es importante seleccionar el tamaño (l), la forma, la geometría y el radio de punta de la plaquita (r_ϵ) correctos:




- 1) Seleccionar el ángulo de punta más grande posible de la plaquita para obtener una mayor resistencia y rentabilidad.
- 2) Seleccionar un radio de punta más reducido si existe tendencia a la vibración.
- 3) Seleccionar la geometría de plaquita basándose en el método seleccionado como, por ejemplo, acabado.



Imagen 18. Consideraciones sobre las plaquitas

Atendiendo al código de descripción de la plaquita podemos conocer sus características principales, las cuáles se muestran a continuación:

TPKN 1603 PPTR-42 IC328

T : Forma de la plaquita (Triangular)
P : Ángulo de incidencia de la plaquita (11º)
K : Tolerancias en pulgadas (los valores B, A, T)
N : Tipo de plaquita  (sin rompevirutas)
16: Tamaño de la plaquita
03: Espesor de la plaquita
328: Índice de calidad



Atendiendo ahora al desgaste de la herramienta, existen varios fenómenos que provocan el desgaste de la herramienta de corte.

Los más destacados son:

- **Abrasión**: Fenómeno ocurrido entre pieza-viruta, produce la pérdida de material de la herramienta.
- **Difusión**: Fenómeno que se produce entre el material de la herramienta y el de la pieza, favorecido por las altas temperaturas.
- **Oxidación**: Se produce en la superficie de la herramienta, ocasionado por las altas temperaturas.
- **Adhesión**: Fenómeno debido a la alta presión de contacto entre viruta y herramienta.

Estos mencionados arriba, son los fenómenos que provocan el desgaste de la herramienta de corte, pero más concretamente, existen varios tipos de desgaste que se van a mencionar y describir brevemente a continuación.

- **Desgaste en incidencia**:

Es el tipo de desgaste más habitual. Se debe al efecto de abrasión sobre la cara de incidencia de la plaquita que produce el material de la pieza al ser eliminado. Supone una vida útil de la herramienta homogénea y estable.

Este tipo de desgaste produce:

- 1) Acabado superficial deficiente
- 2) Geometrías fuera de tolerancias
- 3) Aumento de la potencia consumida

Las causas que lo producen son:

- 1) Velocidad de corte V_c muy alta
- 2) Recubrimiento (calidad) de la plaquita con insuficiente resistencia al desgaste



Las recomendaciones que se dan ante este tipo de desgaste son :

- 1) Reducir la velocidad de corte V_c
- 2) Seleccionar una plaquita con un recubrimiento más resistente.

- **Desgaste tipo cráter:**

Este tipo de desgaste se localiza en la cara de desprendimiento de la plaquita, debido a la reacción química que se produce entre el material de la pieza y el de la herramienta.

Este desgaste produce un debilitamiento del filo de corte y puede provocar la rotura de la plaquita.

Este desgaste se ve potenciado por la velocidad de corte V_c .

Este tipo de desgaste produce:

- 1) Filo de corte débil (rotura de la herramienta)
- 2) Geometría de viruta deficiente
- 3) Acabado superficial deficiente
- 4) Aumento de la potencia consumida

Las causas que lo producen son:

- 1) Material de la pieza: Viruta muy abrasiva
- 2) Temperaturas elevadas: Generan un desgaste de difusión

Las recomendaciones que se dan ante este tipo de desgaste son :

- 1) Reducir el avance y la velocidad de corte V_c (es decir, reducir la temperatura en la zona de corte)
- 2) Seleccionar una plaquita con un recubrimiento más resistente



- Desgaste de tipo filo de aportación BUE:

Este tipo de desgaste se produce por la soldadura de la viruta sobre la plaquita o que parte del filo se queda adherido a la pieza, debido a la presión. Se suele obtener al mecanizar materiales muy dúctiles. La velocidad de corte baja suele incrementar la formación de filo de aportación.

Este tipo de desgaste produce:

- 1) Acabado superficial deficiente
- 2) Posibilidad de rotura del filo de corte cuando se desprende el BUE
- 3) Astillamiento del filo

Las causas que lo producen son:

- 1) Material de la pieza muy dúctil
- 2) Temperatura desfavorable
- 3) Mala refrigeración de la taladrina

Las recomendaciones que se dan ante este tipo de desgaste son:

- 1) Aumentar/reducir la velocidad de corte (T^a alta/baja)
- 2) Aumentar volumen y presión del refrigerante en la zona de corte

- Desgaste por deformación plástica:

Este tipo de desgaste se produce cuando el material de la herramienta se ablanda, debido a una temperatura de mecanizado muy alta para la calidad de la plaquita.

Este tipo de desgaste produce:

- 1) Acabado superficial deficiente
- 2) Geometrías fuera de tolerancias



Causas que lo producen:

- 1) T^a corte muy alta combinada con una presión muy alta (avance y/o dureza de la pieza)

Recomendaciones:

- 1) Reducir la velocidad de corte y el avance para así disminuir la T^a
- 2) Disminuyendo el avance por revolución se reduce la presión de contacto.

- Desgaste por entalladura:

Este tipo de desgaste se produce como consecuencia del daño excesivo y localizado tanto en la cara de desprendimiento como en el flanco de la herramienta.

Está condicionado este desgaste por las elevadas velocidades de corte V_c y las altas temperaturas.

Los efectos que tiene este desgaste son que se debilita el filo de corte y se produce una ruptura abrupta.

Ahora, vamos a pasar a tratar otros parámetros del mecanizado como la velocidad de corte especificada por el fabricante según el material a mecanizar, y el tipo de viruta.

Comenzamos por describir los distintos tipos de viruta que nos podemos encontrar en un proceso de mecanizado, y cuáles son sus causas.



Los diferentes tipos de viruta que se pueden dar en un proceso de mecanizado son:

- Viruta continua
- Borde acumulado (BUE)
- Viruta escalonada
- Viruta discontinua

La **viruta continua** tiene las siguientes características:

- Materiales dúctiles, velocidades y ángulos de ataque grandes.
- Zona de cizallamiento angosta.
- Buen acabado superficial.
- Indeseable por interferencia con las máquinas (uso de rompevirutas).

El **borde acumulado BUE** presenta las siguientes características:

- Cambia la geometría del filo de corte.
- Mal acabado superficial.
- Un borde delgado y estable es favorable, reduciendo el desgaste en el filo.

La **viruta escalonada** presenta las siguientes características:

- Posee zonas de alta y baja deformación de corte.
- Metales con baja conductividad térmica y resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura.

La viruta discontinua presenta las siguientes características:

- Materiales frágiles, o que contienen inclusiones o impurezas.
- Velocidades muy bajas o muy altas.
- Profundidad de corte y ángulo de ataque grandes.
- Las fuerzas en la herramienta varían continuamente.

Con respecto a la velocidad de corte de la fresa, este valor está recomendado para la plaquita según el tipo de material que se mecaniza.

Esta información se ha extraído de la página web de la marca "Iscar Tools", y se muestra a continuación en la **Imagen 19**:

Cutting Speed for: TPKN 1603PPTR-42 IC328 - 5601315

ISO	Material	Material Description	Material Condition	Cutting Speed Recommendations
P	1	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel <0.25%C.	Annealed :125	140-180 m/min
P	2	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel >=0.25%C.	Annealed :190	125-150 m/min
P	3	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel <0.55%C.	Quench and tempered. :250	100-120 m/min
P	4	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel >=0.55%C.	Annealed :220	90-110 m/min
P	5	Non-alloy steel and cast steel, free cutting steel >=0.55%C.	Quenched & tempered. :300	80-100 m/min
P	6	Low alloy & cast steel (less than 5% of alloying elements).	Annealed :200	120-160 m/min
P	7	Low alloy & cast steel (less than 5% of alloying elements).	Quenched & tempered :275	90-140 m/min
P	8	Low alloy & cast steel (less than 5% of alloying elements).	Quenched & tempered :300	80-120 m/min
P	9	Low alloy & cast steel (less than 5% of alloying elements).	Quenched & tempered :350	70-110 m/min
P	10	High alloyed steel, cast steel and tool steel.	Annealed :200	60-80 m/min
P	11	High alloyed steel, cast steel and tool steel.	Quenched & tempered :325	55-120 m/min
M	12	Stainless steel and cast steel.	Ferritic/martensitic :200	100-180 m/min
M	13	Stainless steel and cast steel.	Martensitic :240	100-140 m/min
M	14	Stainless steel and cast steel.	Austenitic :180	80-120 m/min
K	15	Grey cast iron (GG)	Pearlitic/ferritic :180	70-140 m/min
K	16	Grey cast iron (GG)	Pearlitic/martensitic :260	60-120 m/min
K	17	Nodular cast iron (GGG)	Ferritic :160	130-240 m/min
K	18	Nodular cast iron (GGG)	Pearlitic :250	110-200 m/min
K	19	Malleable cast iron.	Ferritic :130	180-330 m/min
K	20	Malleable cast iron.	Pearlitic :230	160-290 m/min
S	31	High temp. alloys Fe based.	Annealed :200	30-40 m/min
S	32	High temp. alloys Fe based.	Cured :280	25-35 m/min
S	33	High temp. alloys. Ni or Co based.	Annealed :250	20-30 m/min
S	34	High temp. alloys. Ni or Co based.	Cured :350	20-25 m/min
S	35	High temp. alloys. Ni or Co based.	Cast :320	40-60 m/min
S	36	Titanium Ti alloys.	:310	30-60 m/min
S	37	Titanium Ti alloys.	Alpha+beta alloys cu :310	30-60 m/min

Imagen 19. Velocidades de corte recomendadas por el fabricante

Fuente: <http://www.iscar.com/index.aspx/countryid/1>



El tipo de material elegido en nuestro estudio lleva el número "14" de la lista, ya que es un acero inoxidable austenítico.

Así pues la velocidad de corte orientativa que nos recomienda el fabricante "Is-car Tools" es de:

$$V_c = 80 - 120 \text{ (m/min)}$$



CAPÍTULO III

Cadena de medida





3. Cadena de Medida

3.1. Introducción

En este capítulo se tratará de explicar y describir la metodología que ha sido empleada para la realización de los ensayos. También se detallarán pormenorizadamente los materiales, herramientas y elementos que han sido necesarios para la realización de este estudio de fuerzas de corte en fresado para un acero AISI 316L ASS.

Los elementos componentes en la cadena de medida son:

- Dinamómetro rotativo Kistler
- Acondicionador de señal
- Tarjeta de adquisición WaveBook/512
- Ordenador, a través del cual ha tenido lugar el registros de datos



3.2. Objetivos

Definimos primero que se entiende por una cadena de medida.

Una cadena de medida es un conjunto de instrumentos que convierten a una magnitud mecánica en una forma observable y cuantificable, siendo proporcional a dicha magnitud mecánica.

Se ha de mencionar que las cadenas de medida no son todas iguales, si no que dependen de las características que se quieran potenciar.

El conjunto de dispositivos que constituirán la cadena de medida, son los siguientes:

1. Transductor
2. Acondicionador
3. Indicador
4. Analizador
5. Registrador

El recorrido que lleva la señal es el mostrado en la **Imagen 20** mostrada a continuación:

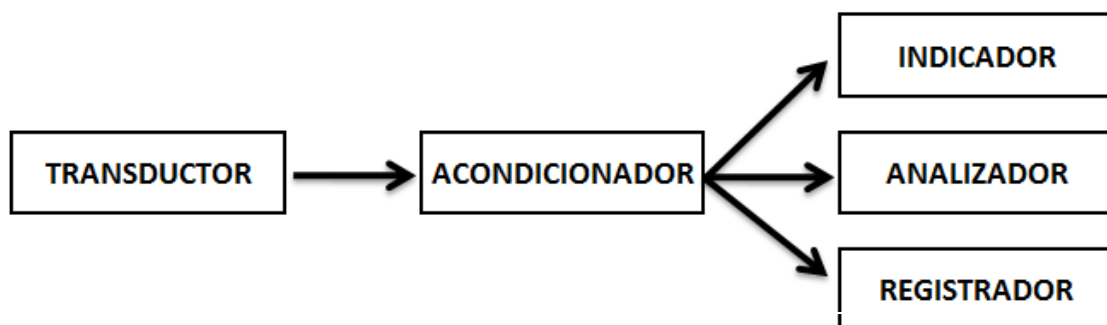


Imagen 20. Esquema del recorrido de una señal



A continuación vamos a hacer una breve descripción del conjunto de elementos que constituyen una cadena de medida:

- **Transductor**: Es el dispositivo que convierte la magnitud a medir (fuerza, aceleración, desplazamiento, etc) en una señal eléctrica que es proporcional a dicha magnitud.

El elemento de transducción es la parte del transductor que realiza la conversión de la magnitud mecánica en señal eléctrica.

Habitualmente la cadena de medida utiliza medios eléctricos o electrónicos de tratamiento de la señal, por lo tanto el transductor debe ser capaz de generar una señal eléctrica que sea una representación lo más fiel posible de las magnitudes a medir.

Por lo tanto la señal del transductor debe recoger y representar toda la información necesaria para el estudio que se quiere realizar.

- **Acondicionador**: Es el elemento que modifica la señal, normalmente amplificándola, ya que la señal procedente del transductor es normalmente débil y puede contener otras componentes que la enmascaren.

- **Indicador**: Es el elemento que actúa como convertidor de energía y transforma una entrada eléctrica en otra proporcional que la representa y es más fácilmente medible, cuantificable y comparable.

Este elemento puede ser muy diferente, desde un osciloscopio o un amperímetro, hasta un PC con el software adecuado.

- **Analizador**: Es un equipo de medición electrónica que permite visualizar en la pantalla las componentes espectrales en un espectro de frecuencias de las señales presentes en la entrada.



- **Registrador:** Puede ser cualquier elemento que muestre de forma permanente o almacenable la señal, ya sea en papel o en otro medio, para poder reproducir de nuevo la señal o acceder a la misma posteriormente,

3.3. Características de la cadena de medida

Las principales características que se han tenido en cuenta para el estudio y elaboración de este proyecto han sido:

1. **Sensibilidad**
2. **Resolución**
3. **Sensibilidad transversal**
4. **Linealidad y sus límites**
5. **Rango de frecuencias de operación**
6. **Requerimientos de calibración**
7. **Propiedades físicas**
8. **Efectos ambientales**



A continuación vamos a dar una noción sobre cada una de las características de una cadena de medida.

- **Sensibilidad:** Es la relación entre la magnitud de la señal eléctrica de salida y la magnitud mecánica de entrada que se mide.

Normalmente se aplica al captador o transductor y generalmente se expresa en unidades de tensión por unidad de magnitud mecánica (nV/N , nV/Nm , etc).

- **Resolución:** Es la variación más pequeña de la magnitud mecánica de entrada para la cual se puede distinguir una variación en la señal eléctrica de salida.

Es el nivel mínimo de la magnitud mecánica que la cadena es capaz de medir eficazmente, e influye en la precisión con la que se realiza la medida.

Esta magnitud puede venir dada por la naturaleza del elemento de transducción, o por el conjunto de la cadena de medida.

Puede estar limitada también por los niveles de ruido o interferencias que puedan producir los diferentes aparatos en la cadena o instrumentos de alrededor.

- **Sensibilidad transversal:** El elemento de transducción no mide con la misma sensibilidad en las diferentes direcciones, la máxima sensibilidad se produce en una determinada dirección y para un resultado óptimo esta debería coincidir con la dirección de la magnitud que buscamos medir.

Por el contrario esto no sucede exactamente, debido a las tolerancias en la fabricación, del elemento, en el montaje del sistema de medida y en las impredecibles variaciones de las características de los elementos.



Siendo S_{max} la sensibilidad máxima, la sensibilidad en la medida dependerá del ángulo que forman las direcciones de medida y de la sensibilidad máxima, de tal forma que:

$$S_{max} = S_{max} \times \text{sen } \alpha_1$$

La sensibilidad según el eje perpendicular a la dirección de medida será S_{pm} .

La sensibilidad transversal máxima se expresa como la tangente del ángulo α_1 y en la práctica su valor varía entre 0.01 y 0.1, y su valor viene expresado en forma de porcentaje.

Podemos conocer la sensibilidad en cualquier dirección del plano transversal aplicando la expresión:

$$S_{max} = S_{max} \times \text{sen } \alpha_1$$

La existencia de una sensibilidad transversal implica que la medida realizada contiene una componente que no está en la dirección deseada, por tanto introduce un error en la medida y por tanto la sensibilidad transversal debe ser lo más próxima posible a cero.

- **Linealidad y sus límites:** La linealidad indica el rango de variación de la medida respecto de unos límites. Una medida es lineal dentro de unos límites especificados, donde la sensibilidad permanece constante dentro del rango permitido.

El límite inferior suele determinado por la resolución del instrumento y el límite superior generalmente se limita con las características eléctricas del transductor o por la resistencia mecánica del instrumento.



- **Rango de frecuencias de operación:** Es aquel en el cual la sensibilidad del transductor no varía más de un porcentaje establecido. Este rango puede estar limitado por las características mecánicas o eléctricas del transductor o el acondicionador de señal acoplado en la cadena de medida.

Estos límites junto con los de linealidad definen completamente el campo donde serán válidas las medidas que se realicen con una cadena específica.

- **Requerimientos de calibración:** Son el conjunto de acciones que se deben realizar para determinar la correcta relación entre la magnitud mecánica medida en la entrada y las señales eléctricas de salida.

Para ello suele ser necesario hacer ensayos previos con resultados conocidos de antemano o cálculos en los que se ven involucrados datos procedentes de las características de todos los instrumentos que componen la cadena de medida.

Con esto se consigue determinar la sensibilidad total de la cadena de medida. Una mala calibración puede provocar que en una o varios de los datos de salida se produzcan fenómenos como la saturación en la señal de salida o la distorsión de la misma.

- **Efectos ambientales:** Son otros de los factores a tener en cuenta aunque su importancia vendrá determinada por la influencia que puedan producir sobre los aparatos de la cadena, de estos factores, los más importantes a tener en cuenta son:

1) **Temperatura:** Puede afectar a las características de funcionamiento principalmente de los transductores, provocando una variación en su rango correcto de funcionamiento.

2) **Humedad:** Tiene mayor influencia sobre los transductores que operan con impedancias eléctricas altas, mientras que los que trabajan con impedancias bajas se ven menos acusados por la humedad. Para este factor es difícil compensar las desviaciones que se producen, en el caso de querer evitarlas



se recurre al sellado hermético u otros aparatos de control de humedad para la sala.

3) **Ruido acústico:** Las vibraciones que se producen por la energía acústica son suficientemente importantes como para introducir errores importantes en las medidas.

- **Propiedades físicas:** Se centra principalmente en las características del transductor.

Ya que el tamaño y sobre todo, el peso influye especialmente en la medida de vibraciones. Así pues un transductor de gran tamaño o peso provoca el cambio en las características de vibración de los elementos y la respuesta de la estructura a los mismos.

Por lo general al aumentar la masa de un elemento su frecuencia natural tiende a disminuir.

Cuanto más grande es el transductor mayor suele ser su sensibilidad, pero puede introducir vibraciones indeseadas, por lo que puede ser interesante usar uno de menor tamaño y amplificar posteriormente la señal.



3.4. Elementos necesarios para el ensayo

Los dispositivos y elementos que han sido necesarios para la realización del ensayo son los siguientes:

- 1) Fresadora
- 2) Dinamómetro rotativo
- 3) Acondicionador de señal
- 4) Sistema de adquisición de datos (WaveBook/512)
- 5) Sistema de tratamiento de datos (DasyLab)

A continuación se describen pormenorizadamente cada uno de ellos:

- Fresadora:

La máquina usada para la realización del mecanizado de las placas de acero, es una fresadora "Correa A16", que dispone de un sistema de control numérico Heidenhain 355, en el cual se pueden programar las condiciones del ensayo.

Algunas de las ventajas de esta máquina, es el sistema CNC que tiene implantado y la facilidad para la instalación del dinamómetro en ella.

A través de un ordenador del laboratorio que está conectado a la máquina, podemos enviar el programa CNC a la fresadora y ésta posteriormente lo ejecute.

La máquina utilizada "Correa A16", se trata de una máquina fresadora de bancada fija equipada con CNC (centro de control numérico). Se muestra en la siguiente **Imagen 21**:



Imagen 21. Máquina fresadora "Correa A16" con la cual se han realizado los ensayos, situada en el laboratorio de fabricación de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid

El mandrino está accionado por un motor de corriente continua.

Está provista de tres desplazamientos accionados automáticamente por motores de corriente continua, acoplados a husillos de bolas.

La selección de los movimientos se efectúa desde el CNC, bien mediante los pulsadores correspondientes situados en la botonera, o bien con el CNC programando dicho movimiento mediante las funciones F •



Imagen 22. Botonera de la máquina fresadora

El movimiento vertical está compensado hidráulicamente mediante un acumulador hinchado con nitrógeno (N). Este movimiento está provisto de un freno de seguridad, que es accionado al quedar la máquina sin tensión, o al producirse pérdida de presión en el circuito de compensación.

Las distintas gamas del mandrino se consiguen mediante una caja de velocidades situada en el interior del carnero. Los cambios de velocidades se realizan automáticamente mediante un sistema hidráulico mandado por el CNC.

- Dinamómetro rotativo:

Hablando en general, los dinamómetros son instrumentos capaces de medir fuerzas a través de magnitudes físicas, como por ejemplo deformaciones o desplazamientos.

El dinamómetro utilizado es de material piezoeléctrico, material que tiene como característica importante que desarrolla una carga eléctrica cuando se ve sometido a una fuerza. Además los materiales piezoeléctricos, microscópicamente están formados por dominios eléctricos tales que a temperaturas bajas están orientados al azar, por lo



que su comportamiento es isótropo y el momento total del dipolo eléctrico es nulo.

Ahora vamos a centrarnos específicamente en el dinamómetro empleado para la realización de los ensayos.

Se trata de un "Dinamómetro Kistler" cuyo modelo comercial o tipo es "9124A".

Es empleado para medidas dinámicas y cuasi-estáticas de las componentes de la fuerza de corte: F_x, F_y, F_z y del momento M_z .

Consiste en piezoeléctricos colocados entre un platillo superior y uno inferior, y sometidos a una gran precarga por medio de una funda.

En un aparato utilizado para medir fuerzas, los materiales piezoeléctricos pueden trabajar a compresión o a cortadura. La respuesta de estos cristales trabajando así se consigue sometiéndolos a una pre-compresión en su montaje, como ocurre en este caso. Si el cristal trabaja en modo de compresión, la carga es proporcionada en la dirección de polarización, mientras que si trabaja en modo de cortadura, la carga es generada en dirección perpendicular a la polarización, con la ventaja de que si existe una carga extra debida a fluctuaciones de temperatura, esta carga no contribuye a la salida del transductor.

En la siguiente **Tabla 6** se muestra la calibración del dinamómetro:

	Rango	F_x	F_y	F_z	M_z
Rango de calibración	I	0-20 KN	0-20 KN	0-30 KN	0-1500 Nm
Sensibilidad		0,467 mV/N	0,467 mV/N	0,341 mV/N	6,590 mV/N
Rango de calibración	II	0-2 KN	0-2 KN	0-3 KN	0-150 Nm
Sensibilidad		4,700 mV/N	4,710 mV/N	3,400 mV/N	66,100 mV/N

Tabla 6. Calibración del dinamómetro



El aparato lleva en su interior un amplificador de carga para cada una de las componentes registradas. El suministro de energía para estos amplificadores es llevado a cabo inductivamente, sin contacto.

Además, un zoom permite una amplificación adicional para los canales F_x , F_y y M_z . También lleva incorporado un sistema de telemetría para transmisión de datos.

La señal de salida de los amplificadores es digitalizada como una señal de 12 bits y transmitida como señal PCM. Esta señal será desmultiplexada al ser recibida por la parte estacionaria del sistema de telemetría, y convertirla otra vez en analógica.

Se disponen de dos rangos, el rango I permite medir con las mayores cargas que soporta el dinamómetro, mientras que el rango II se usa para medir fuerzas menores. Para cada rango hay unas cargas máximas admisibles, para asegurar que los sensores de cuarzo no están sobrecargados.

En el rango I las componentes F_x y F_y deben estar entre -20 y 20 kN, y M_z entre -1500 y 1500 Nm. Para el rango II todos los valores son 10 veces menores. Estos valores de carga máxima vienen impuestos por la despolarización mecánica, ya que si se aplican cargas excesivas sobre un cristal se destruye totalmente su respuesta.

En casos intermedios puede tenerse una pérdida de sensibilidad considerable.

Cuando se hace una medida de la que no se conoce a priori su valor, hay que empezar con el rango I, para evitar sobrecargas si se empieza directamente en el rango II.

En las características del dinamómetro también podemos encontrar la tabla Cross Talk, que nos proporciona los datos de la influencia que genera cada canal sobre el otro, y que deberemos tener en cuenta en el momento de realizar la calibración de los ensayos. A continuación se muestra la tabla Cross Talk en la **Tabla 7**:

	F_x	F_y	F_z
F_x		0,40%	-1,00%
F_y	0,30%		-1,80%
F_z	< 0,10 %	-1,00%	
M_z			0,008 N/Ncm

Tabla 7. Cross Talk

Su construcción es robusta, lo cual le proporciona una gran rigidez y consecuentemente unas frecuencias naturales altas. Sin embargo, el rango de frecuencias de trabajo está determinado tanto por el dinamómetro como por el sistema de telemetría, el adaptador de la herramienta, la herramienta o la propia fresadora.

En la siguiente **Imagen 23** se muestra un esquema del "Dinamómetro Kistler 9124A":

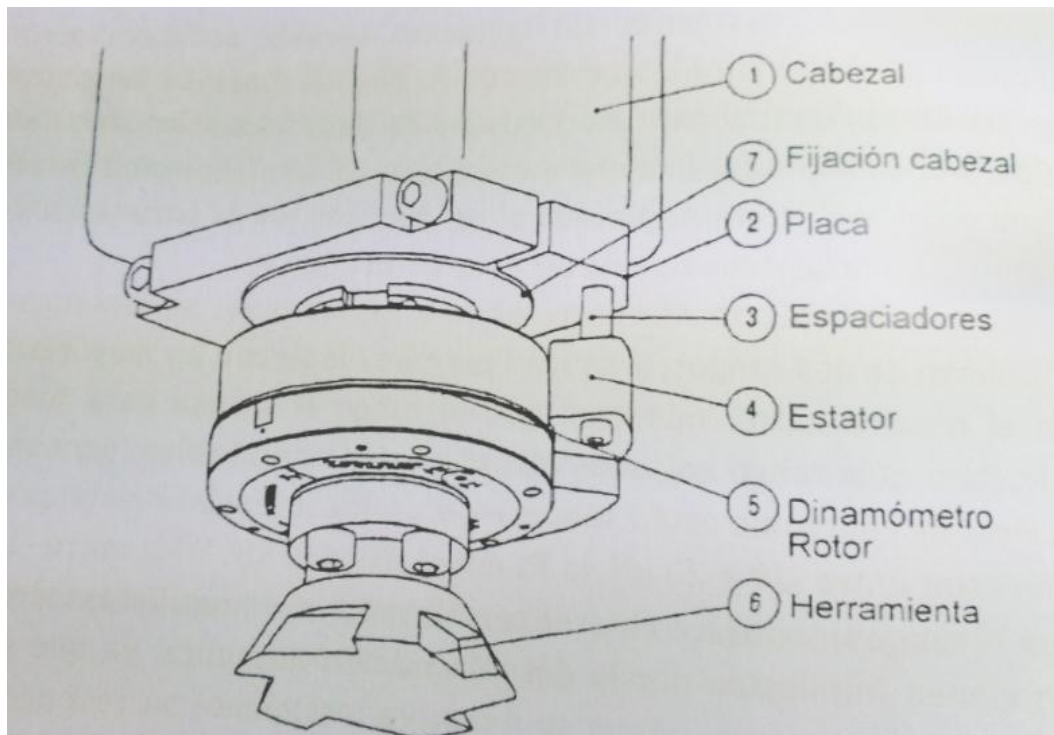


Imagen 23. Dinamómetro Kistler 9124A



Además posee en su construcción un amplificador adicional que permite funciones de zoom con las señales de los canales F_x, F_y, M_z . La transferencia de los datos del dinamómetro se realiza mediante telemetría, existiendo un estator tipo 5221A2 el cual se une mediante cable con el acondicionador de señal tipo 5223A, todos ellos de la marca Kistler.

El dinamómetro como hemos mencionado antes, tiene una gran rigidez, y una frecuencia propia de unos 1000 Hz. Al instalarlo en la máquina, y colocarle la herramienta correspondiente, la frecuencia cambiará situándose en torno a los 500 Hz.

El dinamómetro está instalado en el eje de la fresa, por tanto su referencia es respecto de la herramienta, no de la placa. Dato que hay que tener muy en cuenta en el estudio de fuerzas posterior.

A continuación se muestra en la **Tabla 8**, la carta de propiedades del dinamómetro:

	Símbolo	Unidades	Rango
Velocidad de rotación	n	rpm	≤ 5000
Rango I	F_x, F_y	kN	± 20
Aplicada la fuerza en la placa del dinamómetro	F_z	kN	± 30
	M_z	Nm	± 1500
Overload	F_x, F_y	kN	± 2
	F_z	kN	± 3
	M_z	Nm	± 150
Momento flector máximo admisible	M_{xy}	Nm	$\leq \pm 2400$
Sensibilidad nominal	F_x, F_y	mV/N	0,3
Rango I	F_z	mV/N	0,33
	M_z	mV/Nm	7
	Sensibilidad nominal	F_x, F_y	mV/N
Rango II	F_z	mV/N	3,3
	M_z	mV/Nm	70
	Crosstalk	$F_z - F_x$	%
$F_z - F_y$		%	$\leq \pm 1$
$F_x - F_z$		%	$\leq \pm 3$
$M_z - F_z$		%	$\leq \pm 2$
$F_y - F_x$		%	$\leq \pm 3$
$F_y - F_z$		N/Nm	$\leq \pm 2$
Frecuencia natural	f_x, f_y	Hz	1000
Sin telemetría	f_z	Hz	2700
	fM_z	Hz	1200
	Rango de temperaturas de funcionamiento		$^{\circ}\text{C}$
Grado de protección			IP67

Tabla 8. Carta de propiedades del dinamómetro



En el panel frontal encontramos los mandos que se muestran en la **Imagen 24**. El interruptor 1 sirve para seleccionar el rango de medida I o II. El rango I permite medir señales de mayor amplitud, mientras que el II se utiliza para registrar señales menores. Con el interruptor 2 se pueden poner los canales del 1 al 4 (F_x, F_y, F_z, M_z) en posición de toma de datos o en posición reset, para eliminar así corrientes residuales que puedan quedar en el circuito. El interruptor 3 tiene la misma misión, pero actuando sobre el canal 5 (zoom).

El zoom se puede asignar a los canales de F_x, F_z o M_z a través del mando rotatorio 4. El panel también tiene LED: el 5 se enciende cuando el dinamómetro funciona correctamente y el 6 se ilumina cuando el rotor y el estator no están bien posicionados, por lo que al rotor no llega la energía que necesita y la transmisión de datos no se puede realizar.

Opcionalmente los controles del sistema pueden realizarse manualmente por medio de un PC conectado al acondicionador con un interface RS-232C, en cuyo caso el LED 7 estará encendido, y los controles 1-4 del panel estarán inoperativos.

En el panel trasero del mismo podemos encontrar las entradas para la conexión de las señales, la alimentación y otros elementos, así como los canales de las salidas de los datos hacia el elemento de adquisición de los mismos.

En la **Imagen 25** adjunta a continuación se muestra el panel trasero del acondicionador de señal.

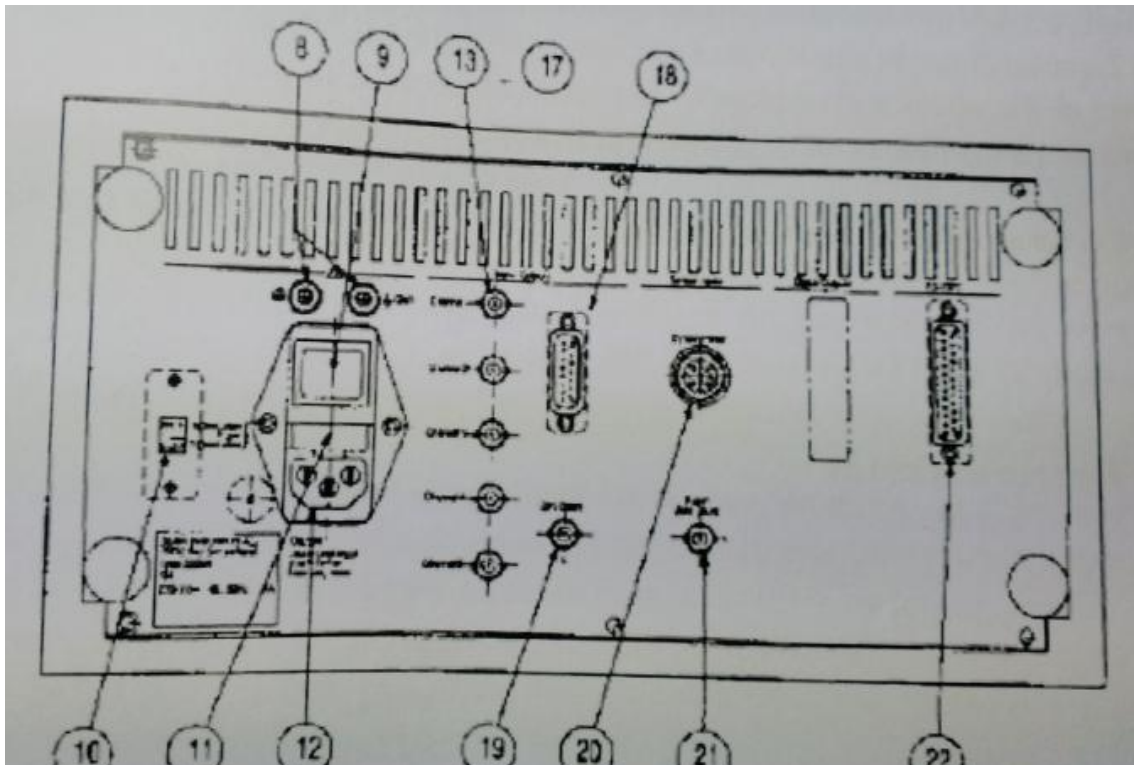


Imagen 25. Panel trasero del acondicionador de señal

La función de los distintos elementos numerados en la **Imagen 25** se detalla a continuación:

- 8 - Toma de tierra del aparato
- 9 - Interruptor general
- 10 - Selector de voltaje 230/115 V
- 11- Fusibles
- 12 - Entrada de energía eléctrica de la red
- 13 - Salida de F_x , canal 1
- 14 - Salida de F_y , canal 2
- 15 - Salida de F_z , canal
- 16 - Salida de M_z , canal 4



- 17 - Salida del zoom, canal 5
- 18 - Salida conjunta de los canales 1-6
- 19 - Salida de la señal del punto 0, canal 6
- 20 - Entrada de la señal del dinamómetro, a través del cable 1500A 19
- 21 - Entrada de la señal externa del punto cero, en el caso de que el modelo de dinamómetro tenga esta opción
- 22 - Entrada del interface RS232C

- Sistema de adquisición de datos:

En la adquisición de datos se ha utilizado el sistema WaveBook/512 de IOtech, con 16 canales de entrada unipolar o bipolar, controlada a través del programa DasyLab 8.0, que también permite el análisis posterior de los datos adquiridos o su exportación para ser tratados con otras herramientas como Excel. La conexión entre el WaveBook y el ordenador se realiza a través del puerto Fast EEP lo que permite recoger hasta un millón de muestras por segundo.

Las características técnicas del WBK-512 con los elementos de los que dispone se muestran en la **Tabla 9** adjunta a continuación:

		Unidades	Rango
Número máximo de canales			16
Conexiones tipo			BNC
Resolución		bits	12
Precisión		%FS (full scale)	±0,025
Offset		LSB máx.	±0,1
Sobretensión máxima		V DC	30
Rangos de entrada	Unipolar Bipolar	V V	0÷1...0÷10 -0,5÷0,5...-5÷5
Corriente de entrada		nA	50 (500 máx)
Impedancia de entrada	Single Ended	MΩ	5
	Diferencial	MΩ	10
Coefficiente de ganancia térmica		ppm/°C	5
Ganancia programable por software			x 1,2,5,10,20,50,100

Tabla 9. Características del WaveBook/512

El sistema lleva instaladas dos tarjetas WBK12 y WBK13 que hacen de filtro pasa bajo, tanto para los 8 canales del WaveBook/512 como para los 8 del módulo de expansión. Estos filtros se configuran desde el PC mediante el software SNAPMASTER. Hay que configurarlos por grupos de cuatro, eligiendo la frecuencia de corte y el tipo de filtro, lineal o elíptico. Si el filtro es elíptico, se pueden tomar frecuencias de corte entre 400 Hz y 1000 kHz, y si es lineal, las frecuencias de corte deberán estar entre 400 Hz y 50 kHz.

La tarjeta WBK13 lleva incorporado un circuito de sample and hold (S&H), en el que la frecuencia de muestreo es de $1 \text{ MHz}/(N + 1)$, donde N es el número de canales activos.

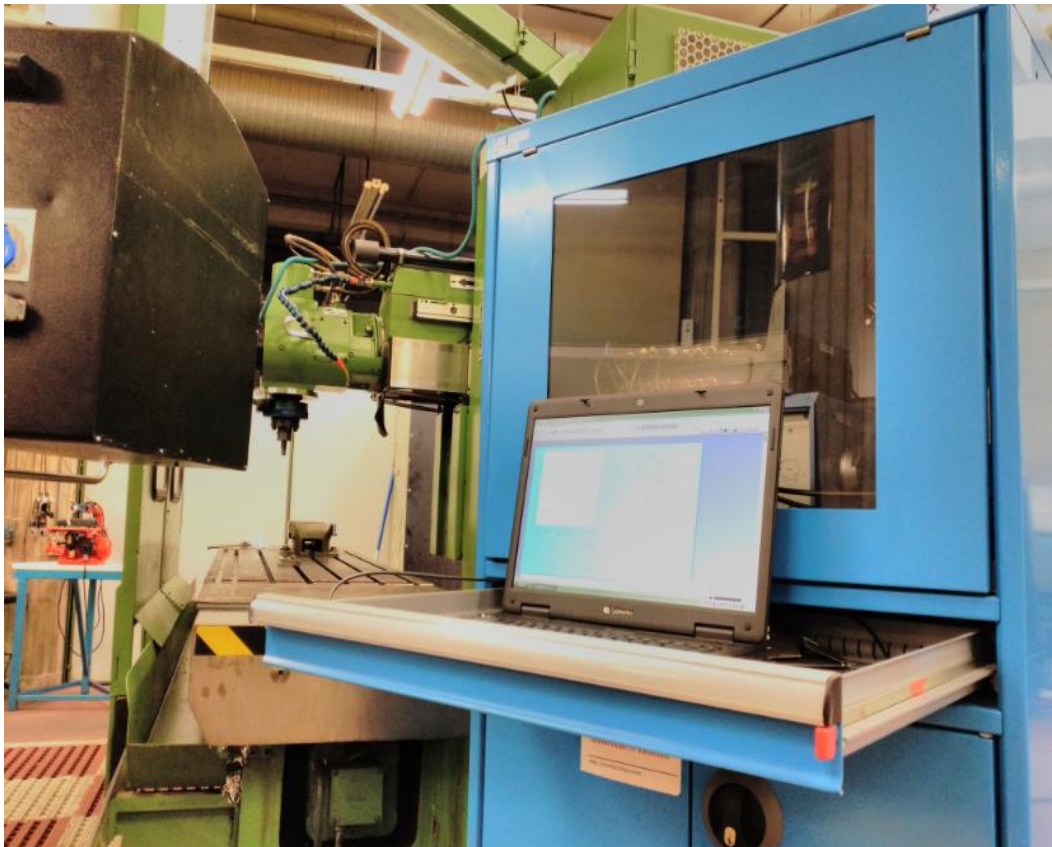


Imagen 26. Sistema de adquisición de datos durante los ensayos

- Sistema de tratamiento de datos:

Finalmente los datos son adquiridos mediante un pc conectado al sistema y usando para ello el software DASyLab 8.0.

Se trata de un programa que consta de varios módulos, que permite la adquisición de los datos a alta velocidad, pudiendo hacer un preprocesador de los mismos, para analizarlos inmediatamente o guardarlos con el objeto de realizar posteriores estudios. También permite exportar los datos o guardarlos en un fichero que podemos abrir con otras herramientas de cálculo y de tratamiento de datos, como Microsoft Excel.

En la pantalla principal o en el espacio de trabajo, llamado "Worksheet", nos encontramos una pantalla como la que se muestra a continuación en la **Imagen 27**:

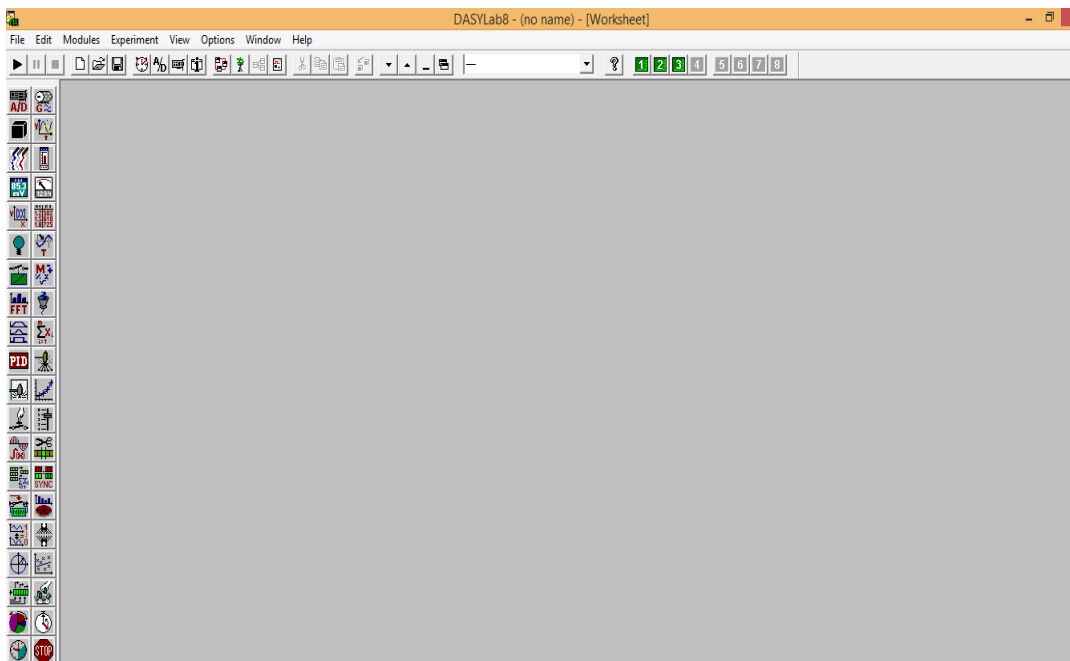


Imagen 27. Pantalla principal del entorno DasyLab 8.0

En la pantalla principal podemos encontrar una barra superior de herramientas que es muy parecida a la que se puede encontrar en otros programas del entorno Windows, donde aparecen las siguientes pestañas: File, Edit, Modules, Experiment, View, Options, Window, Help.

Debajo de esa barra superior principal, aparece otra barra de herramientas con iconos de acceso rápido donde se encuentran algunos de los comandos y operaciones de trabajo más habituales.

La forma de trabajar con DasyLab consiste en hacer un sistema como el que se muestra en la **Imagen 28**, en la cual se van introduciendo los módulos necesarios en la zona de trabajo azul de la pantalla principal, y se conectan entre ellos convenientemente.

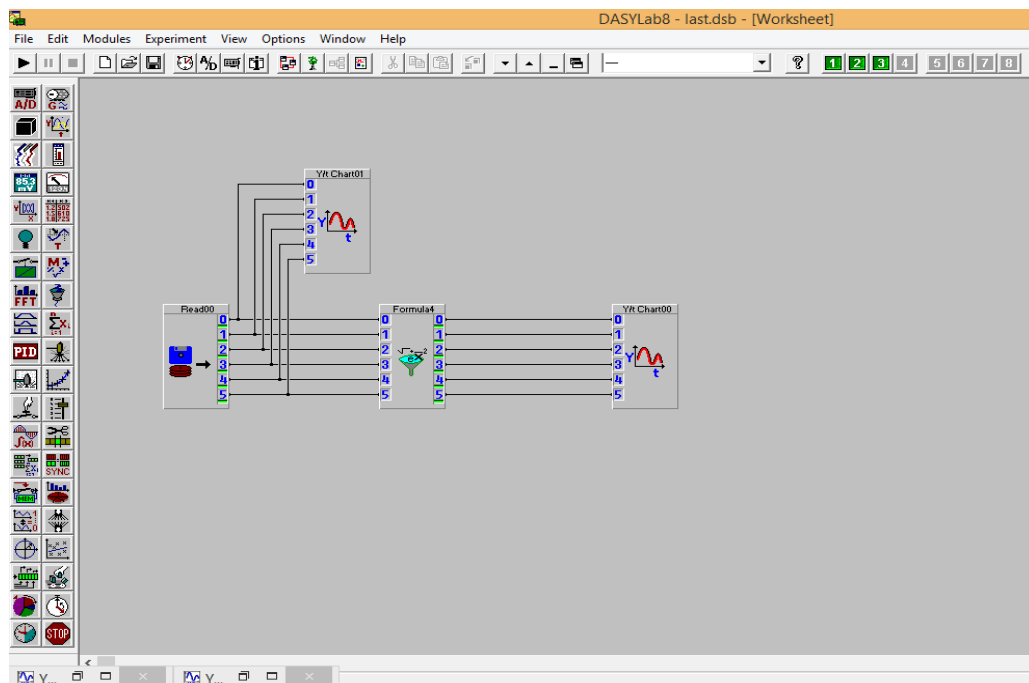


Imagen 28. Pantalla principal del entorno DasyLab 8.0

En la barra de herramientas de la izquierda se representan módulos, los cuales, cada uno de ellos tiene sus propias características, desde la adquisición de datos al filtrado de los mismos, o como el tratamiento y representación o el posterior almacenamiento de los mismos.

Cada módulo puede tener varias entradas y salidas que funcionan independientemente, así pues con un mismo elemento se pueden controlar y conectar varias señales de entrada aunque vengan de sistemas de adquisición diferentes.



Cada línea de unión de los módulos es un canal por el que circula una señal. Este canal se puede diversificar haciendo llegar la misma señal a diferentes módulos de análisis o hacer pasar dicha señal por distintos filtros para su posterior comparación o tratamiento.

3.5. Metodología del ensayo

En este apartado se tratade detallar las herramientas empleadas para la realización del ensayo, el material a mecanizar, así como el sistema de recogida y tratamiento de datos, para el cual se utilizará el software DasyLab.

3.5.1. Herramientas del ensayo

La herramienta que ha sido utilizada para el mecanizado tiene un diámetro de 20 mm, y ha sido acoplada a ella una plaquita que la siguiente denominación:

TPKN 1603 PPTR-42 IC328

El proveedor o fabricante de la misma es "Iscar Tools".

La plaquita utilizada se muestra a continuación en la siguiente **Imagen 29**:



Imagen 29. Plaquita "TPKN 1603 PPTR-42 IC328" utilizada en los ensayos



3.5.2. Material a mecanizar

El material que ha sido empleado en este estudio de fuerzas de corte, es un acero inoxidable austenítico AISI 316L ya definido en apartados anteriores.

Para este proyecto se han usado cuatro placas de este acero, dos de ellas para realizar operaciones de fresado en concordancia "Down milling", y las otras dos para realizar operaciones de fresado en oposición "Up milling".

El fresado tiene lugar en una sólo de las caras de las placas, estando éstas amarradas a la mesa de la máquina fresadora mediante tornillos aprovechando los taladros realizados en las placas. Se puede observar el método de amarre en la **Imagen 30** mostrada a continuación:



Imagen 30. Amarre de las placas en la mesa de la máquina fresadora utilizada para los ensayos

Para cada una de ellas se ha realizado un programa CNC con el que ha trabajado la fresadora, con el objetivo de estudiar el comportamiento de fuerzas y demás parámetros de corte para distintas velocidades de corte y avances por revolución.

En la siguiente **Imagen 31** se muestran tres de las cuatro placas utilizadas para la realización de este proyecto:



Imagen 31. Placas de acero AISI 316-L ASS utilizadas para la realización de los ensayos

3.5.3. Sistema de recogida de datos

La recogida de datos ha sido realizada, como se ha citado anteriormente, siguiendo una cadena de medida en cuyo último eslabón está el ordenador con el software de adquisición de datos DasyLab 8.0.

Para un mejor tratamiento de los datos, se han realizado dos configuraciones diferentes, una para la recogida de datos y otra para el análisis y tratamiento posterior de los mismos.

Empezamos por describir el esquema seguido para la recogida de datos.

Para la adquisición se ha realizado el siguiente esquema Worksheet con DasyLab 8.0 mostrado en la **Imagen 32**:

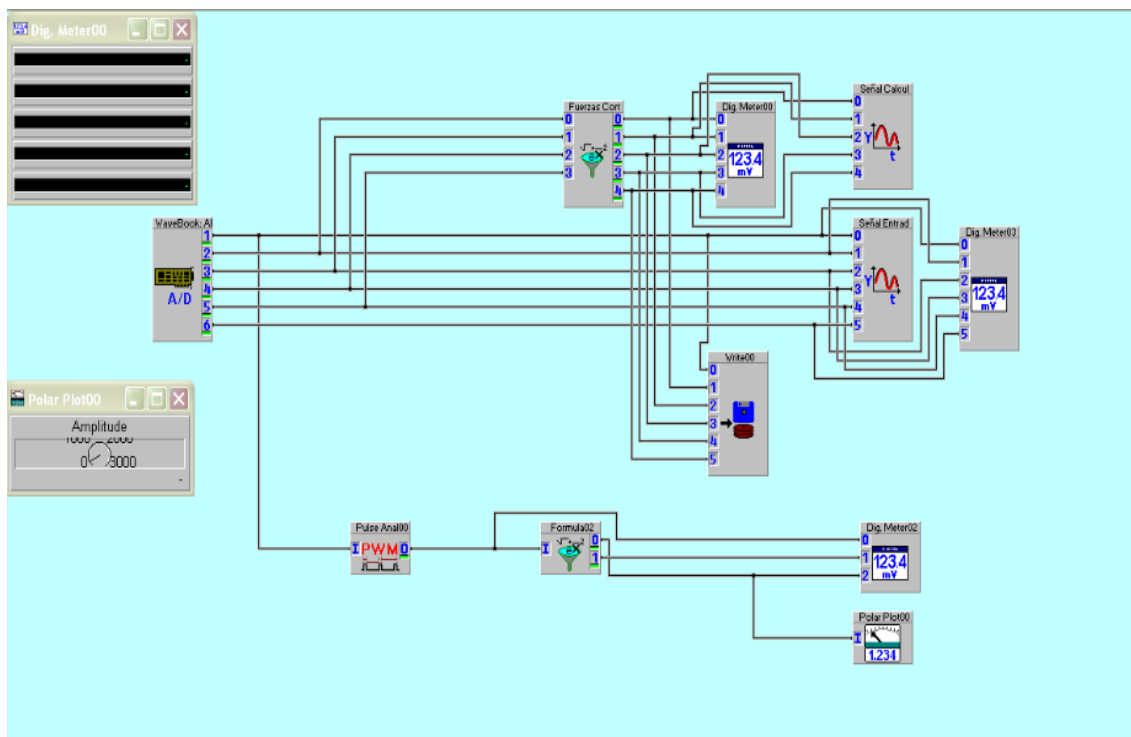


Imagen 32. Configuración del espacio de trabajo en la adquisición de datos en DasyLab 8.0

La señal es adquirida mediante WaveBook/512 que dispone de un módulo propio en el software. Podemos comprobar como de dicho módulo salen 6 canales diferentes para cada señal procedente del dinamómetro y del acondicionador de señal.

En la siguiente **Imagen 33** se muestra dicho módulo:

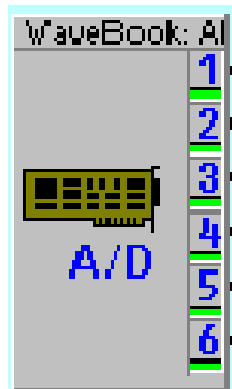


Imagen 33. Módulo de adquisición de datos WaveBook/512

La señal que proporciona la entrada está dada en unidades de tensión y posee un rango diferente para cada canal, por lo tanto es necesario configurar cada entrada con los niveles adecuados, calculados previamente en los ensayos de calibración.

Cada una de las 6 entradas que se tienen son:

- **Referencia:** El dinamómetro rotativo posee un marcador que indica al sistema cada vez que da una vuelta el husillo, para comprobar que el sistema está en funcionamiento y que la velocidad es la correcta. Cada vez que el marcador pasa por el origen envía una señal tipo pulso al sistema.
- F_x : Muestra la fuerza medida por el dinamómetro en el sistema X del sistema de coordenadas de referencia.
- F_y : Muestra la fuerza medida por el dinamómetro en el sistema Y del sistema de coordenadas de referencia.



- F_z : Muestra la fuerza medida por el dinamómetro en el sistema Z del sistema de coordenadas de referencia.

- M_z : Muestra el momento generado en el sentido Z del sistema de coordenadas de referencia.

- **Zoom M_z** : Este canal puede ampliar la señal sobre uno de los anteriores canales, en este caso sobre el que indica el momento en el eje Z.

En la siguiente **Tabla 10** se muestran los valores introducidos de forma individual para cada uno de los canales en el sistema mediante la edición del módulo, seleccionando en cada caso el canal y editando su valor correspondiente y las unidades en las que se mide:

	Entrada	Rango
Canal 1	Referencia	$\pm 5.00 \text{ V}$
Canal 2	F_x	$\pm 2.50 \text{ V}$
Canal 3	F_y	$\pm 2.50 \text{ V}$
Canal 4	F_z	$\pm 1.00 \text{ V}$
Canal 5	M_z	$\pm 1.00 \text{ V}$
Canal 6	Zoom M_z	$\pm 1.00 \text{ V}$

Tabla 10. Rango de valores de la señal de entrada

A continuación en la **Imagen 34** se muestra como es la inserción de estos valores mostrados en la **Tabla 10** para cada canal. En la **Imagen 34** se representa concretamente para el valor F_x :

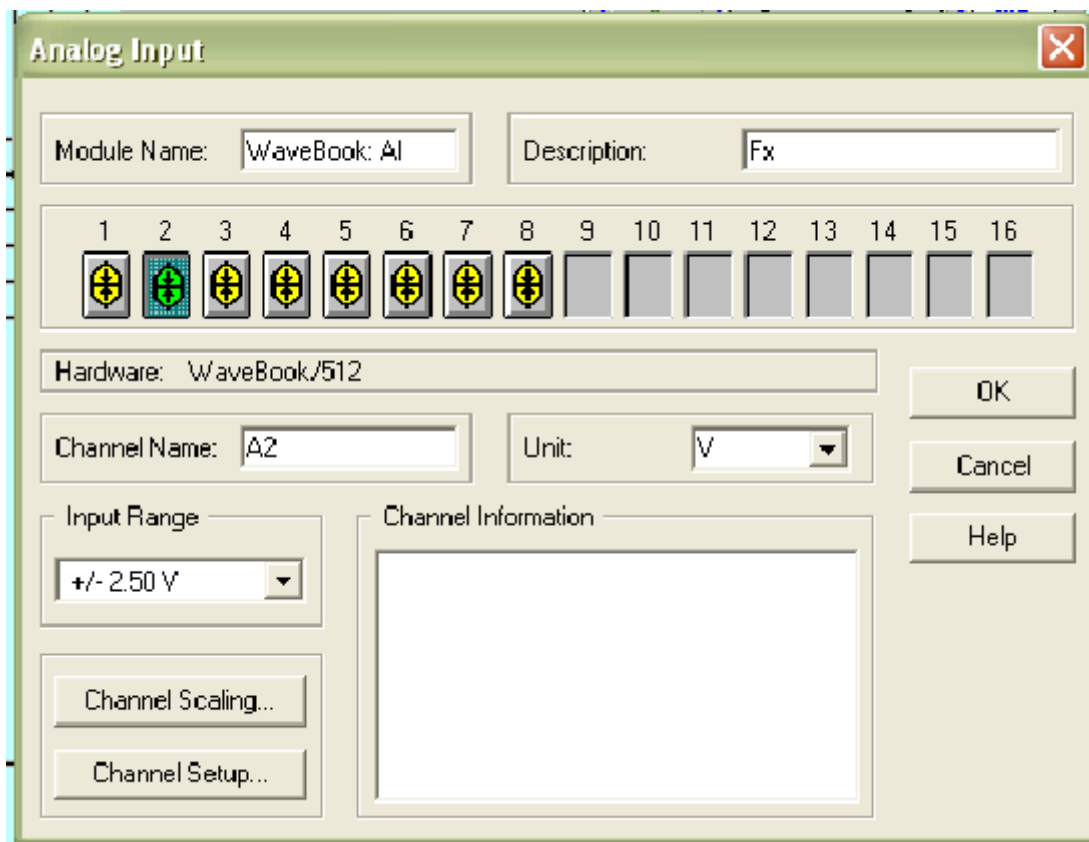


Imagen 34. Cuadro de edición de las entradas

Ya que la señal de entrada es de tipo analógica, se conecta un módulo fórmula, como el que se muestra en la **Imagen 35**:

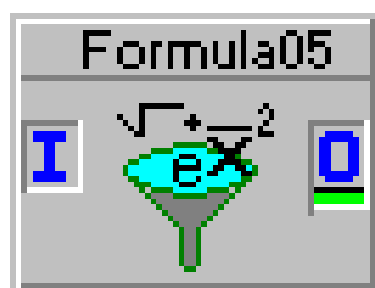


Imagen 35. Módulo fórmula

El objetivo de este módulo es editar por separado cada canal aplicando una fórmula matemática diferente según lo que se pretenda obtener.

Gracias a este módulo transformamos la señal analógica medida por el dinamómetro en la unidad correspondiente, según el parámetro con el que deseemos trabajar.

En nuestro sistema de adquisición de datos, tenemos dos módulos de fórmula, el primero para obtener las fuerzas de corte convirtiendo los valores analógicos de entrada.

En la **Imagen36** se muestra el módulo de fórmula para obtener las fuerzas de corte:

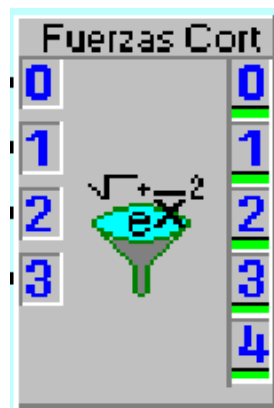


Imagen 36. Módulo fórmula para la obtención de la fuerzas de corte

Tiene 4 señales de entrada y 5 de salida.

Las señales de entrada son:

- F_x
- F_y
- F_z
- M_z

Lo que pretendemos es cambiar las unidades de cada uno de ellos, esto lo haremos gracias a la información extraída de la **Tabla 6** de calibración del dinamómetro. Además de transformar las unidades de F_x , F_y , F_z , M_z , creamos una nueva fuerza, que es el módulo de la fuerza F_{mod} , teniendo en cuenta la fuerza en el eje X y la fuerza en el eje Y.

A continuación en la **Tabla 11** se muestran las ecuaciones matemáticas de transformación empleadas:

	Parámetro	Ecuación
Input 0	F_x	$IN(0)/0.000467$
Input 1	F_y	$IN(1)/0.000467$
Input 2	F_z	$IN(2)/0.000341$
Input 3	M_z	$IN(3)/0.00659$
	F_{mod}	$((IN(0)/0.000467)^2 + (IN(1)/0.000467)^2)^{1/2}$

Tabla 11. Ecuaciones matemáticas de transformación empleadas para el módulo fórmula para obtener las fuerzas de corte

A continuación en la **Imagen 37** se muestra la pestaña de edición de este módulo:

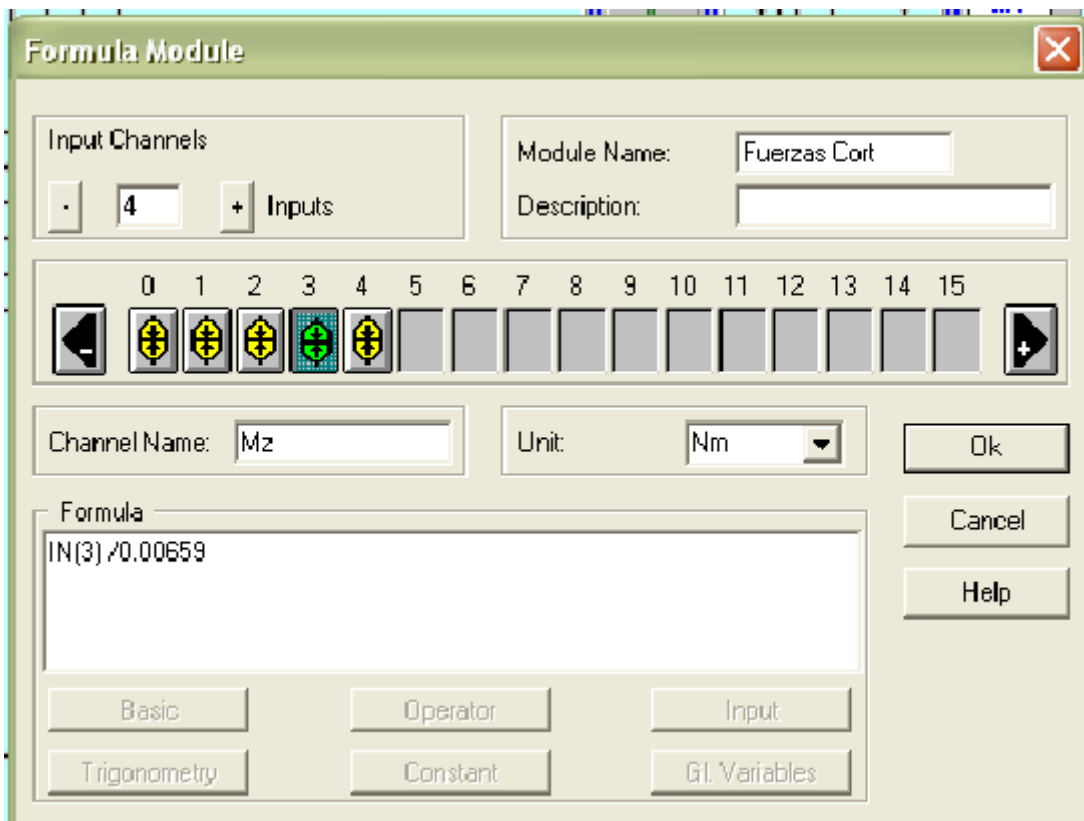


Imagen 37. Pestaña de edición del módulo fórmula



Donde IN() indica el número de entrada interno del módulo.

Los módulos comienzan a numerar las entradas y salidas por el 0, y no por el 1 como el módulo de entrada WaveBook/512.

Se puede apreciar también en los cuadros de edición de los diferentes elementos como el canal sobre el que se está trabajando se encuentra de color verde, mientras que los canales inactivos están en gris, y los activos pero que no estamos editando se muestran de color amarillo.

El segundo módulo de fórmula que se ha usado para este sistema de adquisición de datos sirve para convertir la pulsación de la señal de referencia en las unidades correspondientes de la velocidad de giro del husillo en rpm y la velocidad de corte en (m/min).

Este módulo fórmula tiene 1 señal de entrada y 2 señales de salida, se puede observar en la **Imagen 38**:

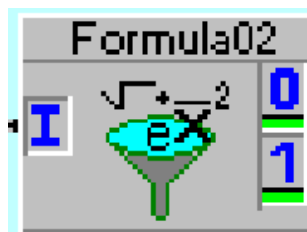


Imagen 38. Módulo fórmula para la obtención de la velocidad de giro del husillo

En la **Imagen 39** se representa la pestaña de edición de este módulo de fórmula para calcular la velocidad de rotación de la fresa:

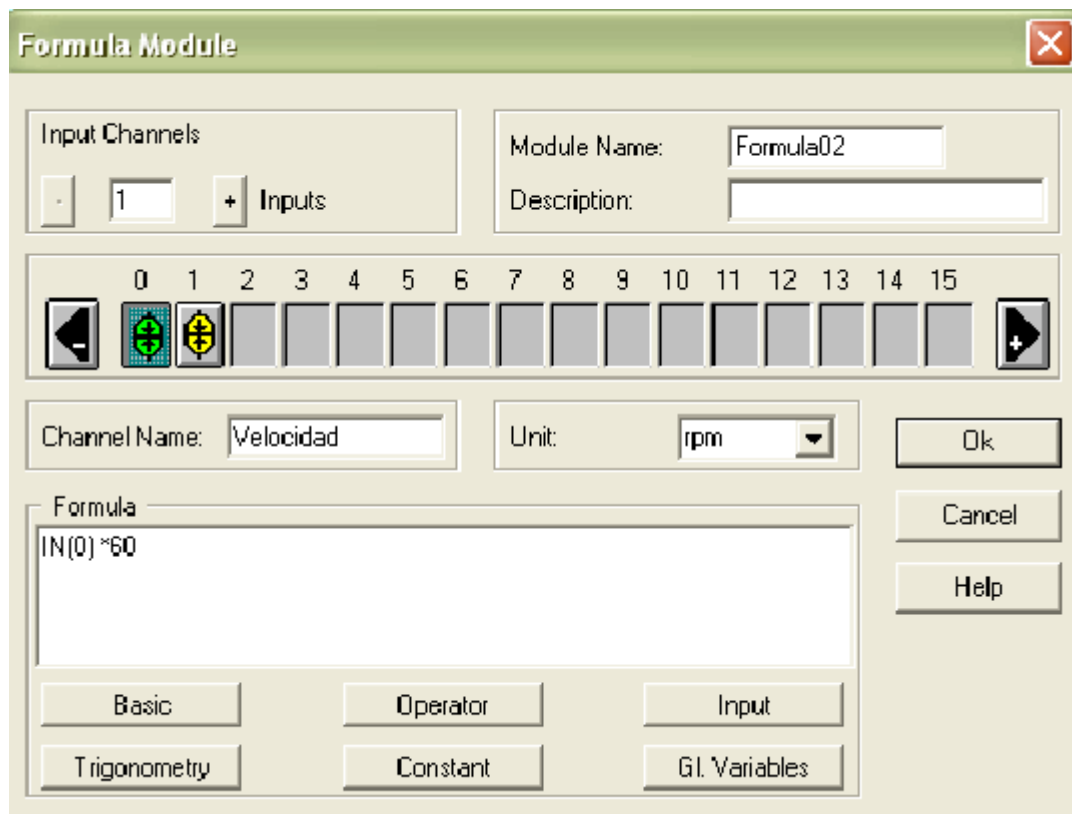


Imagen 39. Pestaña de edición del módulo fórmula para calcular la velocidad de giro de la fresa

Para calcular la velocidad de corte de la herramienta, sólo basta con relacionar ésta con la velocidad de giro del husillo, con la expresión que se vió en el apartado 2 de este trabajo:

$$V_c \left(\frac{m}{min} \right) = \frac{n (min^{-1}) \times \pi \times D_c (mm)}{1000 (mm/m)}$$

Siendo $D_c = 20$ mm

En este sistema de adquisición de datos se ha utilizado tres módulos "Digital Meter".



Imagen 40. Módulo Digital Meter

Este módulo representado en la Imagen 40 sirve para dar el valor o valores numéricos de las señales a las cuáles este módulo está conectado.

Los valores que nos da cada uno de los tres "Digital Meter" de este sistema son:

- 1) Las fuerzas de corte que salen del módulo "Fórmula"
- 2) Las señales analógicas de cada uno de los canales que mide el dinamómetro (para comprobar que no hay defectos en la señal de entrada)
- 3) La señal de la frecuencia en (Hz) del canal de referencia, la velocidad de corte de la herramienta (m/min) y la velocidad de giro del husillo en (rpm).

La manera de representar estos datos con este módulo "Digital Meter" se muestra en la siguiente Imagen 41 para el caso 3) :

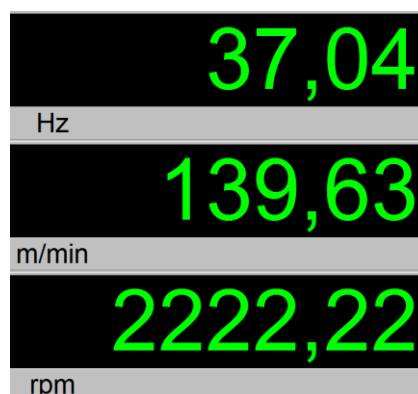


Imagen 41. Valores obtenidos con el módulo "Digital Meter"

La pestaña de modificación de datos "Digital Meter" se representa en la siguiente **Imagen 42**:

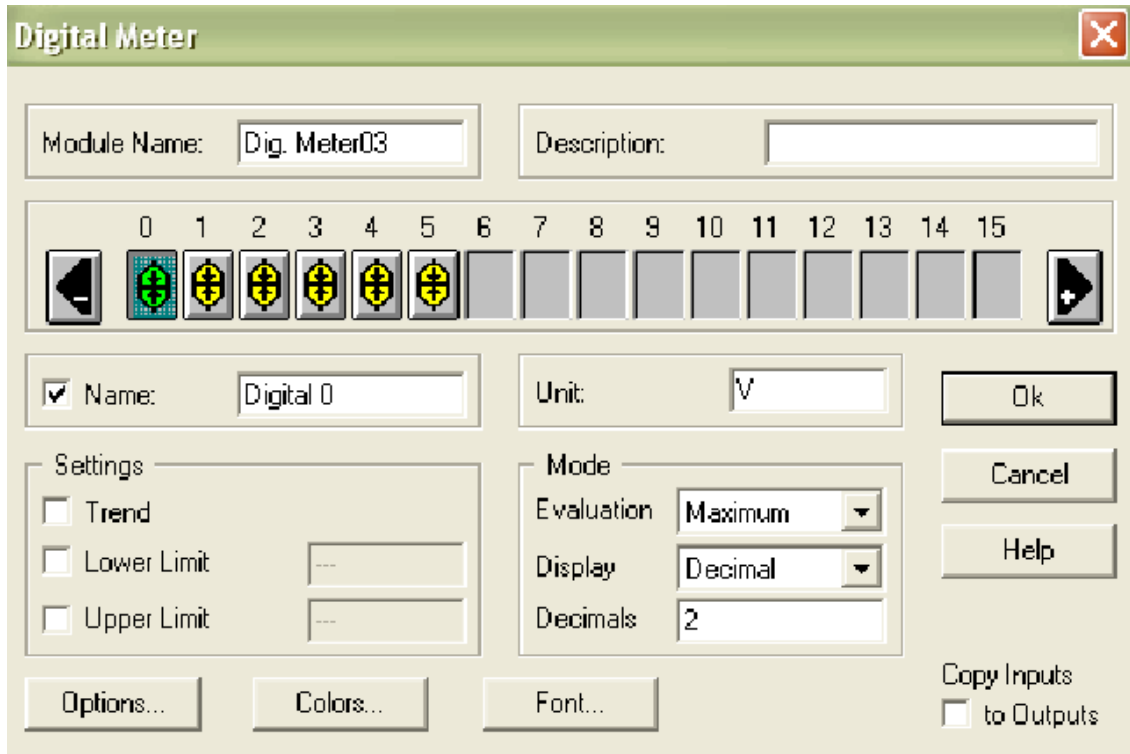


Imagen 42. Pestaña "Digital Meter"

El módulo "Polar Plot" es un contador que representa la señal a la que esté conectado. En este caso, este módulo lo utilizamos para representar la velocidad de rotación de la fresa (rpm) como se puede observar en la siguiente **Imagen 43**:

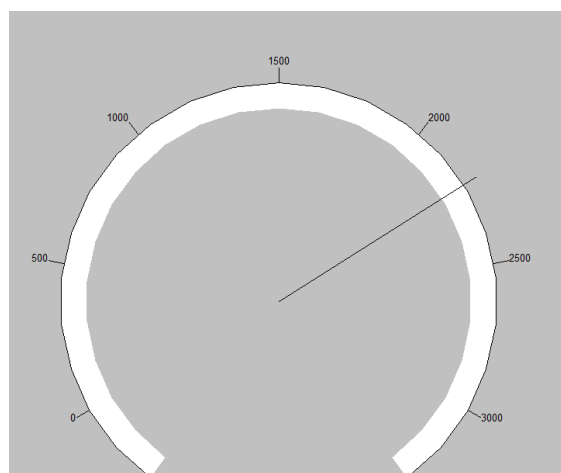


Imagen 43. Valores obtenidos de rpm con el módulo "Polar Plot"

Este módulo tiene la siguiente representación dada en la **Imagen 44**:

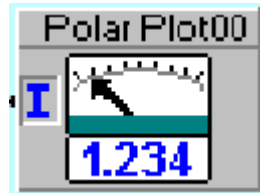


Imagen 44. Módulo Polar Plot

El módulo "Y/t Chart" sirve para representar un parámetro (el correspondiente a la señal conectada con este módulo) con respecto al tiempo.

Se representa mediante el siguiente símbolo mostrado en la **Imagen 45**:

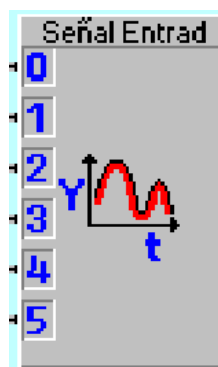


Imagen 45. Módulo Y/t Chart

En nuestra configuración de adquisición de datos, utilizamos dos módulos de este tipo. Los utilizamos para las siguientes funciones:

- 1) Representar las señales analógicas de los 6 canales que se miden con el dinamómetro con respecto al tiempo.
- 2) Representar las fuerzas: F_x , F_y , F_z , F_{mod} y el momento M_z con respecto al tiempo.

En la **Imagen 46** se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con este módulo que se encuentra en la sub-categoría "Display" dentro de la pestaña de la barra de herramientas "Modules":

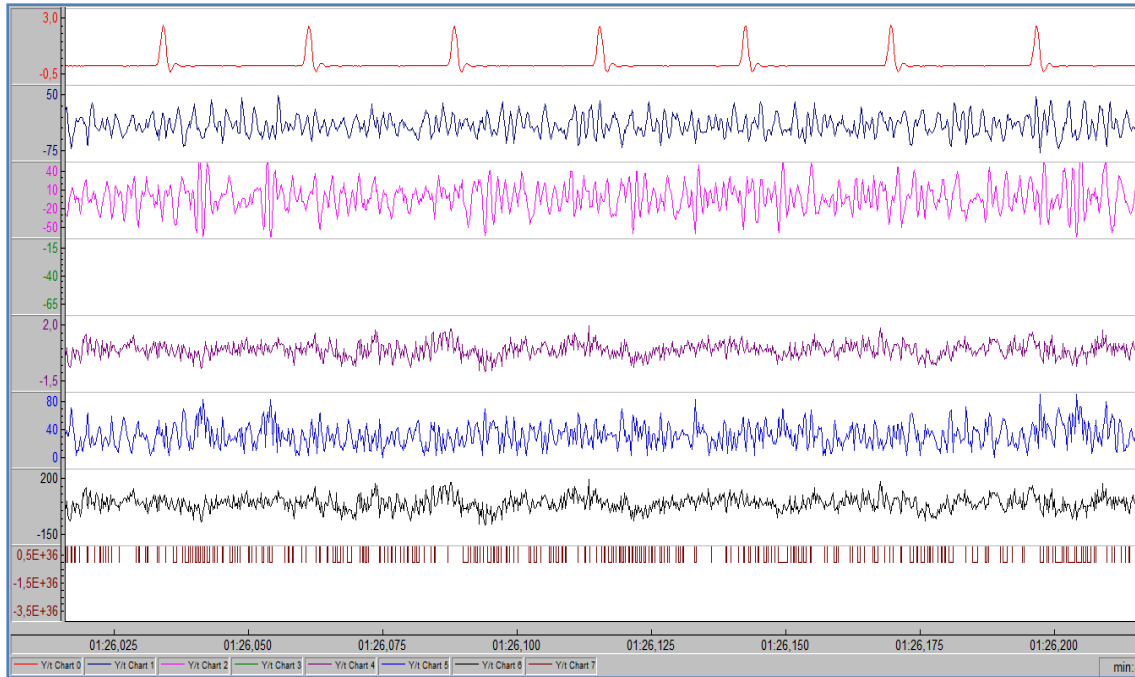


Imagen 46. Ejemplo de resultados obtenidos con el módulo "Y/t Chart"

El módulo "Pulse Analysis" está conectado a la señal de referencia medida por el dinamómetro, lo utilizamos para expresar esta señal analógica en una señal de frecuencia en Herzios (Hz). El icono utilizado para este módulo se muestra en la **Imagen 47**:

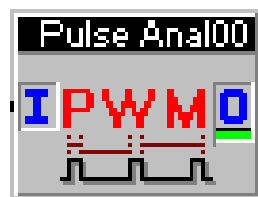


Imagen 47. Ícono "Pulse Analysis"

Por último basta sólo por nombrar el módulo de escritura "Write" mostrado en la **Imagen 48**:

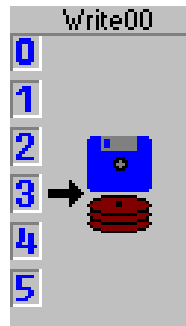


Imagen 48. Módulo de escritura "Write"

Se configura este módulo con 6 entradas: la señal analógica de referencia, las tres fuerzas medidas por el dinamómetro en los ejes X,Y,Z, el momento M_z y el módulo de la fuerza F_{mod} como composición de las fuerzas en el eje X y en el eje Y.

Los datos son almacenados en un fichero para su posterior estudio y tratamiento.

El módulo de escritura se ha configurado para que guarde automáticamente los datos en un archivo con una nomenclatura correlativa para poder identificarlos más adelante.

Los archivos guardados tienen el siguiente nombre y el programa CNC que a cada uno de ellos corresponde es el siguiente:

- **316L_UP_170415_e1.DDF** correspondiente al programa CNC: 401
- **316L_UP_170415_e2.DDf** correspondiente al programa CNC: 503
- **316L_DOWN_170415_e1.DDF** correspondiente al programa CNC: 501
- **316L_DOWN_170415_e2.DDF** correspondiente al programa CNC: 502

3.5.4. Proceso de tratamiento de datos

La segunda de las configuraciones es la de análisis y tratamiento de datos, en la cual volcamos los datos que hemos guardado de los ensayos y procedemos a su evaluación y a realizar los análisis correspondientes.

La configuración realizada para el tratamiento de datos en el espacio de trabajo Worksheet del software DasyLab 8.0 es la siguiente mostrada en la **Imagen 49**:

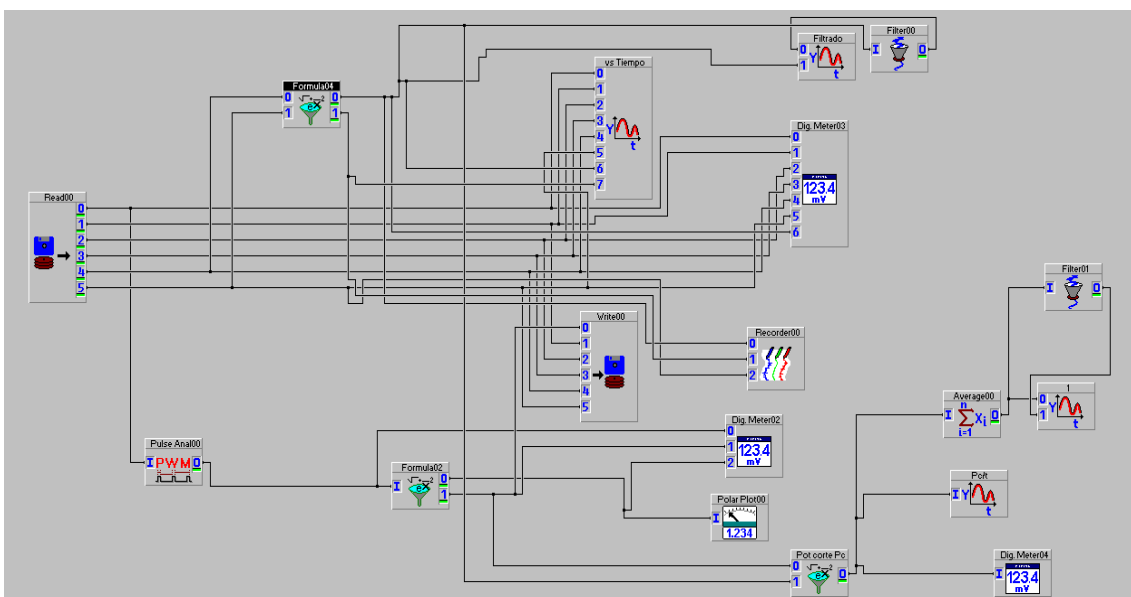


Imagen 49. Configuración "Worksheet" para el sistema de tratamiento de datos

Se recuperan los datos almacenados mediante el módulo de lectura y se distribuyen por los diferentes módulos atendiendo cada uno de ellos a una función específica.

Como se puede apreciar en el esquema de la configuración, a un mismo canal se le pueden aplicar diferentes tipos de análisis o tratamientos, ya que podemos dividir un canal haciendo que la señal de partida llegue a dos o más puntos de destino sin tener por ello pérdida de información.

Para esta configuración de análisis y tratamiento de datos, se utilizan módulos que ya se habían utilizado para la adquisición de los mismos, como: los gráficos en función del tiempo, el módulo de fórmulas, el de pulsos, el módulo de medida digital "Digital Meter", el módulo "Polar Plot" o también el de escritura "Write".

Además de ellos, se utilizan nuevos módulos, como el de filtrado de señales "Filter", el módulo "Recorder" o el módulo de reducción de datos "Average".

A continuación explicamos brevemente la función de cada uno de ellos en este sistema.

El módulo de filtro digital, presenta el siguiente icono en nuestro programa, mostrado en la **Imagen 50**:

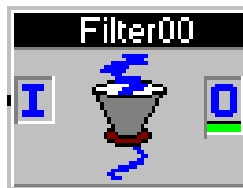


Imagen 50. Módulo de filtro digital

Se utiliza como un filtro pasabajos (low pass), con un límite de frecuencia de 100 Hz, y un orden de 4 en una escala de 0 a 10, como se muestra en la **Imagen 51**:

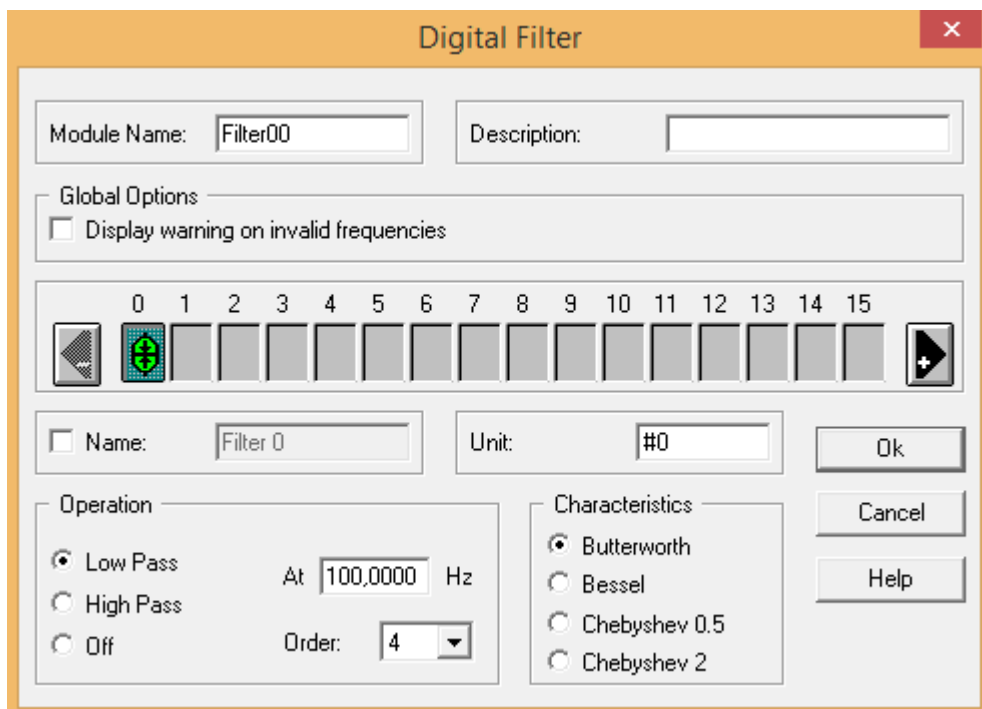


Imagen 51. Opciones de configuración del filtro digital

Con este módulo conseguimos la respuesta en frecuencia que deseemos, y podemos reducir elementos externos que afectan a nuestro ensayo y provocan ruido en la señal, elementos que traen consigo errores en la medida.



El módulo "Average", mostrado en la **Imagen 52**, es un módulo cuyo objetivo es la reducción de datos sin que por ello se pierda información de los mismos.

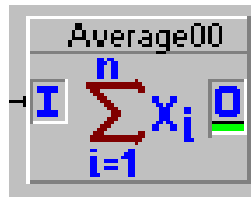


Imagen 52. Módulo "Average"

Con este módulo se calcula el valor medio basándose en la media aritmética, reduciendo con ello la variabilidad en el proceso y reduciendo el número de datos, ya que la frecuencia de muestreo del aparato de medida nos proporciona 5000 medidas por cada canal.

Reducimos el número de datos sin perder información ya que con la numerosa cantidad de muestras y el método de adquisición, los valores fluctúan en torno al valor real. La medida no es que esté mal tomada, sino que el material no es perfectamente homogéneo y por ello existen pequeñas variaciones en las fuerzas que mide el dinamómetro en cada instante.

Realizamos la media cada 10 valores intentando con ello aproximarnos lo máximo posible a la situación real. En la **Imagen 53** se muestran las opciones de configuración de este módulo:

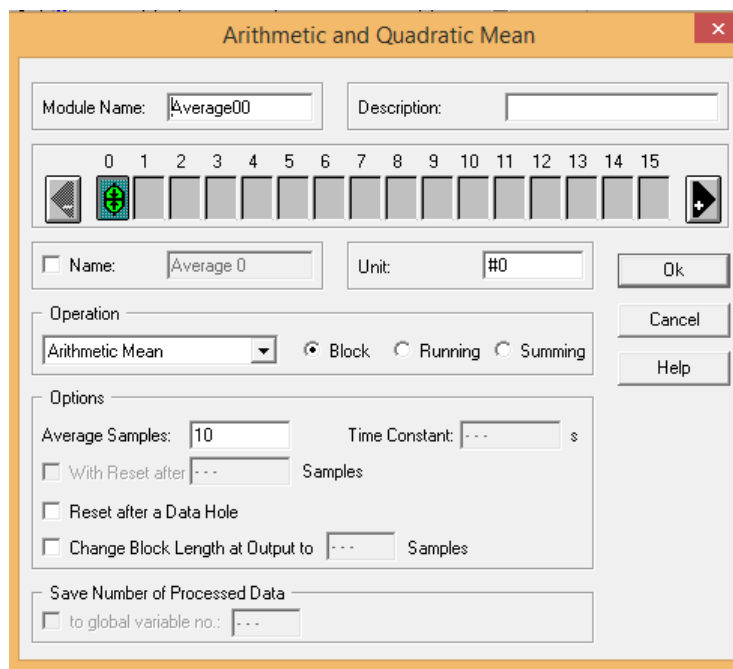


Imagen 53. Configuración módulo "Average"

Por último falta por describir el módulo "Recorder", que se encuentra en la misma sub-categoría de representación gráfica "Display". Se muestra en la siguiente **Imagen 54**:

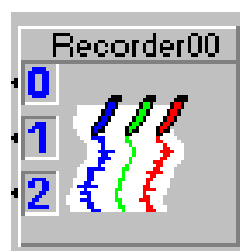


Imagen 54. Módulo "Recorder"

Es un módulo gráfico, al igual que "Y/t Chart" o "X/Y Chart", el cual lo utilizamos para representar la fuerza de corte, la fuerza radial o tangencial, y la fuerza resultante (combinación de estas dos últimas).

Ahora vamos a describir las ecuaciones con las que trabajamos en este sistema de adquisición de datos para el módulo "Formula".

Las señales de entrada que se leen mediante el módulo de lectura, nos proporcionan el valor de la señal analógica de entrada, las fuerzas medidas por el dinamómetro en los ejes X,Y,Z, la fuerza resultante de la combinación de las fuerzas en el plano de corte en los ejes X e Y (F_{mod}) y el momento generado en el eje Z.

Las fuerzas están en sus unidades correctas en el Sistema Internacional, es decir en Newton (N), el momento en N*m, y la señal de entrada está en Voltios.

Utilizamos tres módulos en este sistema de adquisición, con cada uno de los cuales se pretende conseguir la siguiente función:

- 1) La fuerza de corte y la fuerza radial o tangencial del mecanizado.
- 2) La velocidad de corte y la velocidad de giro de la fresa.
- 3) La potencia de corte del mecanizado

La velocidad de corte y la velocidad de giro de la fresa ya se describió en el apartado anterior "Adquisición de datos" como se conseguía, y por medio de qué expresión se relacionaban ambas velocidades.

Así que vamos a centrarnos en describir en primer lugar las fuerzas sobre las que rige este proyecto: la fuerza de corte, la fuerza radial/tangencial y la fuerza resultante de ambas.

El módulo con la que se calculan es el siguiente mostrado en la **Imagen 55**:

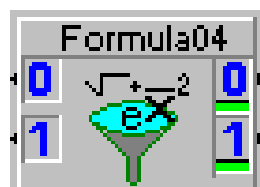


Imagen 55. Módulo "Formula" para calcular la fuerza de corte y la fuerza radial



Como se puede observar, tiene dos señales de entrada, que son:

- M_z

- F_{mod}

Respectivamente las señales "Input" 4 y 5 en el programa.

En la siguiente **Tabla 12** se muestran las entradas "Inputs", las ecuaciones empleadas, y las salidas "Outputs":

Input	Ecuacion	Output
Input 0 Mz	$IN(0)/0.01$	Fc
Input 1 Fmod	$((IN(1)^2 - (IN(0)/0.01)^2)^{1/2})$	Fr

Tabla 12. Obtención de las señales de salida: Fc, Fr

Para obtener la fuerza de corte Fc, lo hacemos teniendo en cuenta la siguiente **Imagen 56** en la que se muestran las fuerzas en el mecanizado (F_r, F_c, R) y el momento en el eje Z (M_z) que mide el dinamómetro. La perspectiva de la **Imagen 56** es vista la fresa siguiendo el eje Z, es decir, desde la planta:

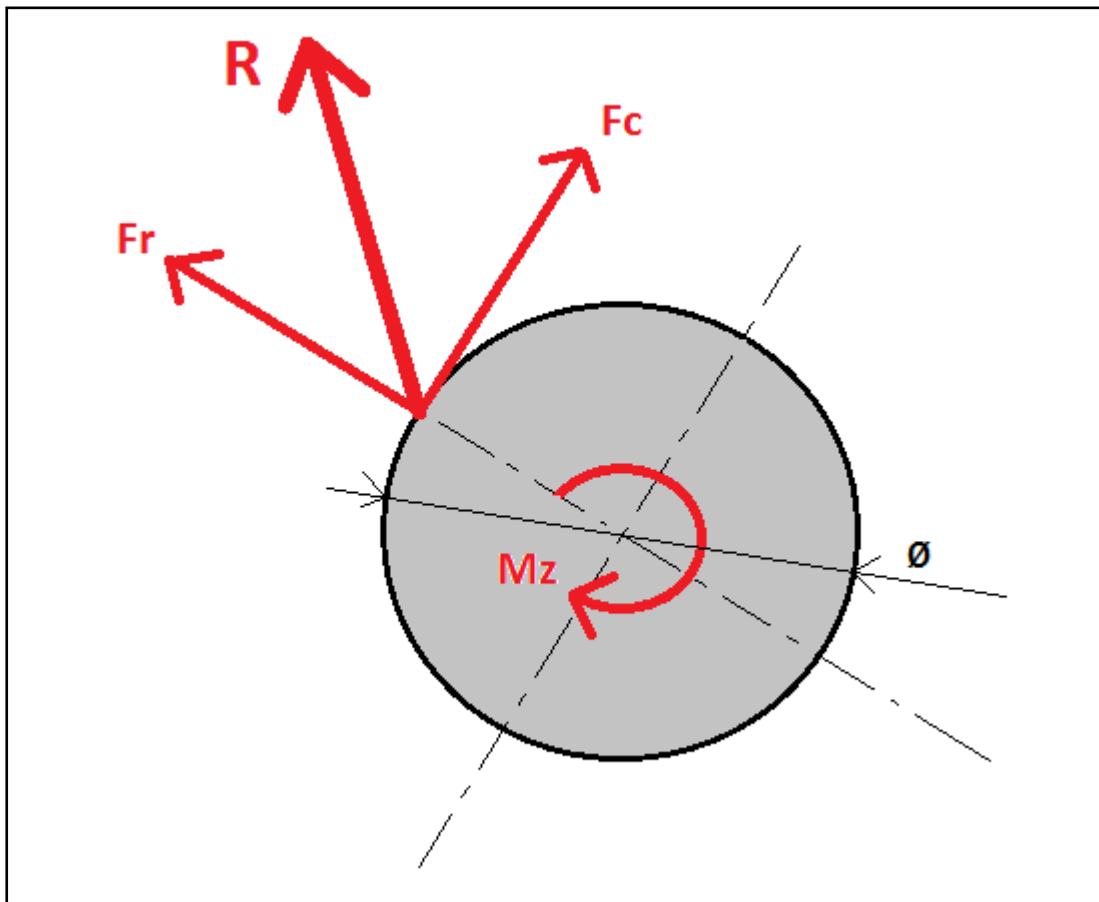


Imagen 56. Representación de las fuerzas en el mecanizado y el momento medido por el dinamómetro viendo la fresa en planta desde el eje Z

Hemos de recordar que el dinamómetro tenía la posición de referencia en el centro de la herramienta.

Para un mejor entendimiento, se muestra la **Imagen 57** a continuación, en la cual se representan las fuerzas que mide el dinamómetro fijado en el centro de la fresa, y las fuerzas de mecanizado, las cuales parten de la plaquita que mecaniza:

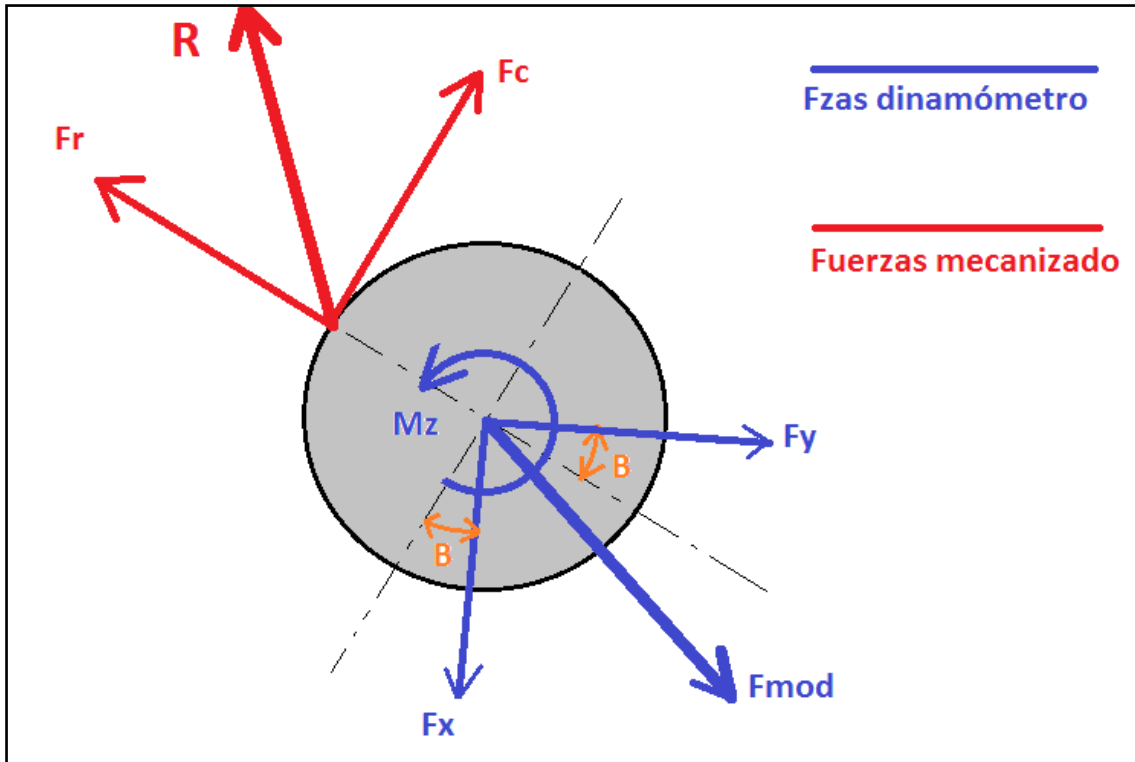


Imagen 57. Representación de las fuerzas del mecanizado y fuerzas medidas por el dinamómetro

El diámetro de la fresa mide 20 mm, con lo cual la distancia que están separados el eje del que parte las fuerzas medidas por el dinamómetro y las fuerzas en el mecanizado, es de 10 mm, es decir de 0,01 metros.

Dicho esto, vamos a describir por qué se han utilizado esas expresiones que se muestran en la **Tabla 12** para calcular la fuerza de corte F_c y la fuerza tangencial o radial F_r .



- Para calcular la fuerza de corte F_c :

$$M_z = F_c \times \left(\frac{\emptyset}{2}\right)$$

Dado que $\emptyset = 0,02$ m

La fuerza de corte resulta:

$$F_c = \frac{M_z}{\left(\frac{\emptyset}{2}\right)} = \frac{M_z}{0,01}$$

- Para calcular la fuerza radial F_r :

Sabemos que las fuerzas medidas con el dinamómetro han de ser de igual valor que las fuerzas que actúan en el mecanizado, ya que sólo varía que no estamos en el mismo sistema de referencia. Se puede calcular este valor de la fuerza radial de varias maneras al igual que la fuerza de corte, como luego se describirá, pero una de ellas es teniendo en cuenta lo siguiente:

Las fuerzas medidas en el plano X,Y de corte en:

- El centro de la herramienta (medidas del dinamómetro): F_x, F_y, F_{mod}
- Teniendo el origen de fuerzas en la plaquita que mecaniza: F_c, F_r, R

Las fuerzas: F_{mod} y R son las fuerza resultantes de F_x, F_y y de F_c, F_r , respectivamente.

F_{mod} y R pueden tener distinta dirección y sentido, pero el valor numérico es el mismo.

Así pues se hace la siguiente deducción para calcular la fuerza radial:

$$R = \sqrt{F_c^2 + F_r^2};$$

$$F_{\text{mod}} = \sqrt{F_c^2 + F_r^2};$$

Despejando la fuerza radial, conocidas F_{mod} y F_c , nos queda:

$$F_r = \sqrt{F_{\text{mod}}^2 - F_c^2}$$

También se podría haber calculado la fuerza de corte F_c y la fuerza radial F_r conocidas las fuerzas F_x , F_y que mide el dinamómetro en el plano 2D de mecanizado y resolviendo un problema de cambios de sistema de referencia. Vamos a verlo:

Teniendo en cuenta la **Imagen 58**:

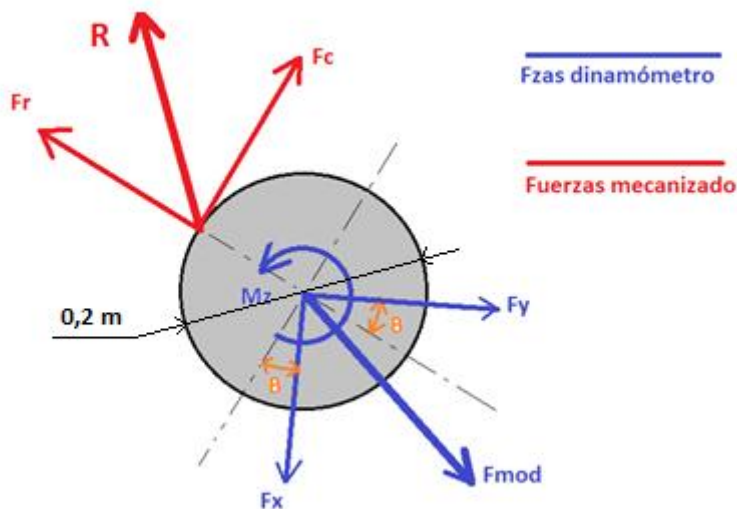


Imagen 58. Representación de las fuerzas del mecanizado y fuerzas medidas por el dinamómetro

Al no estar en el mismo eje de referencia, hay que resolver dos problemas:

- 1) Translación
- 2) Rotación

Para resolver ambos problemas vamos a calcular dos matrices, la primera de cambio de base para el movimiento de translación y la segunda para el ángulo dado de rotación.

Empezamos por resolver el movimiento de translación que en la **Imagen 59** se nos plantea:

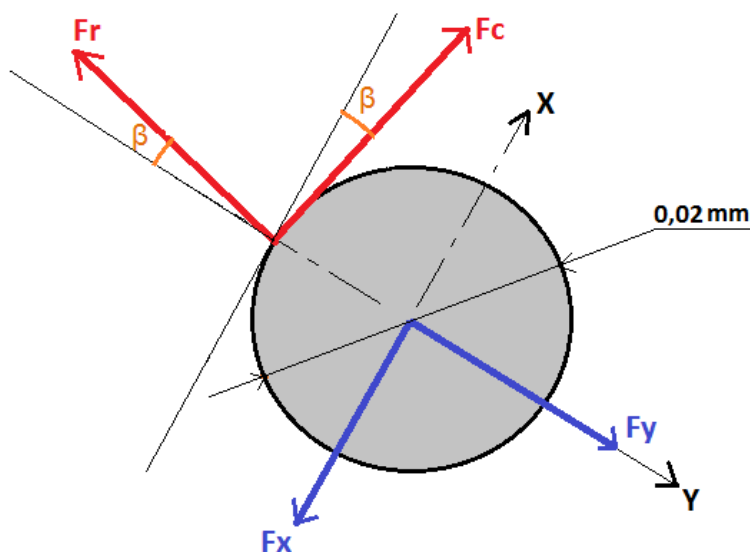


Imagen 59. Representación de las fuerzas del mecanizado y fuerzas medidas por el dinamómetro

- A la matriz de translación la nombraremos como: T
- La distancia que separa ambos ejes de coordenadas es: $\emptyset/2$

La matriz de translación nos queda:

$$|T| = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & r_y & 1 \end{pmatrix}$$

Siendo r_y la distancia entre los dos sistemas de referencia. Así pues:

$$|T| = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0,01 & 1 \end{pmatrix}$$

Ahora vamos a resolver el problema de rotación. La situación en la que nos encontramos ahora, tras haber resuelto el problema de translación, es la siguiente mostrada esquemáticamente en la **Imagen 60**:

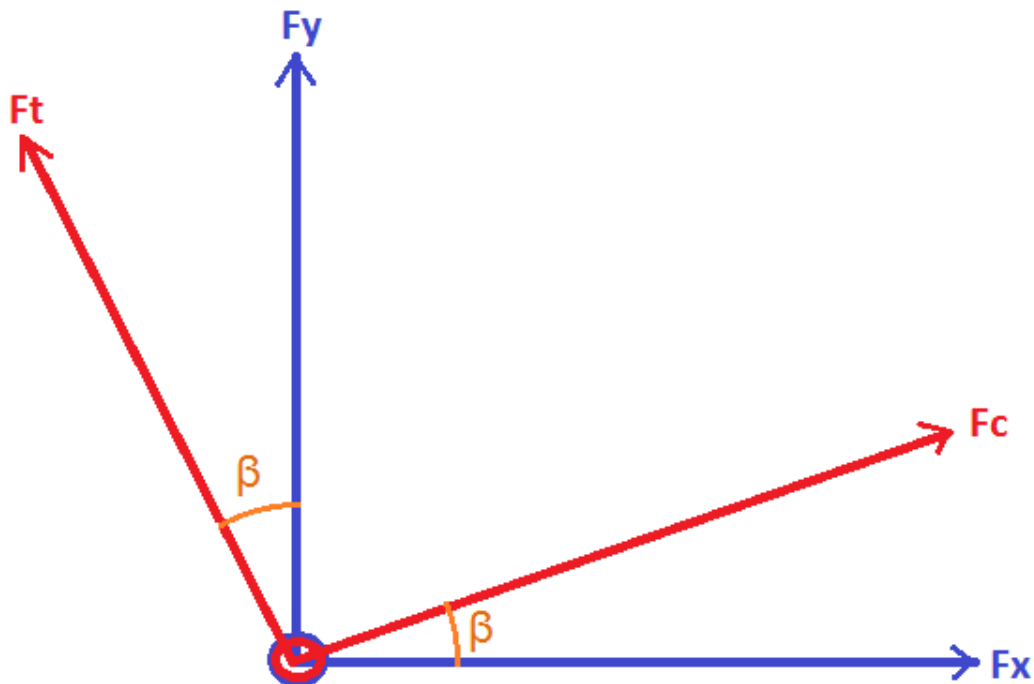


Imagen 60. Representación de las fuerzas del mecanizado y fuerzas medidas por el dinamómetro con origen en el mismo punto



La matriz cambio de base de rotación de las fuerzas medidas con referencia en el dinamómetro a las fuerzas tomadas desde el la plaquita que mecaniza, queda:

$$|R| = \begin{pmatrix} \cos \beta & \operatorname{sen} \beta & 0 \\ -\operatorname{sen} \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Siendo **R** la matriz de rotación.

Así pues, la matriz de cambio de base translación + rotación de la base con el eje de coordenadas en el eje de giro de la fresa a la base con el eje de coordenadas con referencia en la plaquita, queda:

$$|TR| = \begin{pmatrix} \cos \beta & \operatorname{sen} \beta & 0 \\ -\operatorname{sen} \beta & \cos \beta & 0 \\ 0,01 \cdot \operatorname{sen} \beta & 0,01 \cdot \cos \beta & 1 \end{pmatrix}$$

Siendo **TR** la matriz "translación + rotación".

De este modo podemos calcular de manera análoga al modo que se explicaba con anterioridad, la fuerza de corte **F_c** y la fuerza radial **F_r**:

$$\overline{F_c} = |TR| \times \overline{F_x} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \operatorname{sen} \beta & 0 \\ -\operatorname{sen} \beta & \cos \beta & 0 \\ 0,01 \cdot \operatorname{sen} \beta & 0,01 \cdot \cos \beta & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\overline{Fr} = |\mathbf{TR}| \times \overline{Fy} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \operatorname{sen} \beta & 0 \\ -\operatorname{sen} \beta & \cos \beta & 0 \\ 0,01 \cdot \operatorname{sen} \beta & 0,01 \cdot \cos \beta & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ F_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

El ángulo de rotación β se puede calcular mediante la información que nos proporciona el software DasyLab 8.0.

La pulsación de la señal de referencia (Canal 0 de la **Imagen 61**) indica cuando la fresa comienza a girar. El resto de señales de dicha **Imagen 61** muestran las fuerzas de corte en los diferentes ejes (X,Y,Z), el momento respecto el eje Z, y el módulo de la fuerza en el plano de mecanizado (X,Y).

Como podemos observar en la **Imagen 61** existe un período de tiempo desde que la fresa o herramienta comienza a girar hasta que ésta toca el material (impulso de las señales 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 de la **Imagen 61**) y comienza a mecanizarlo. Ese período de tiempo, lo vamos a calcular, para poder determinar el ángulo β .

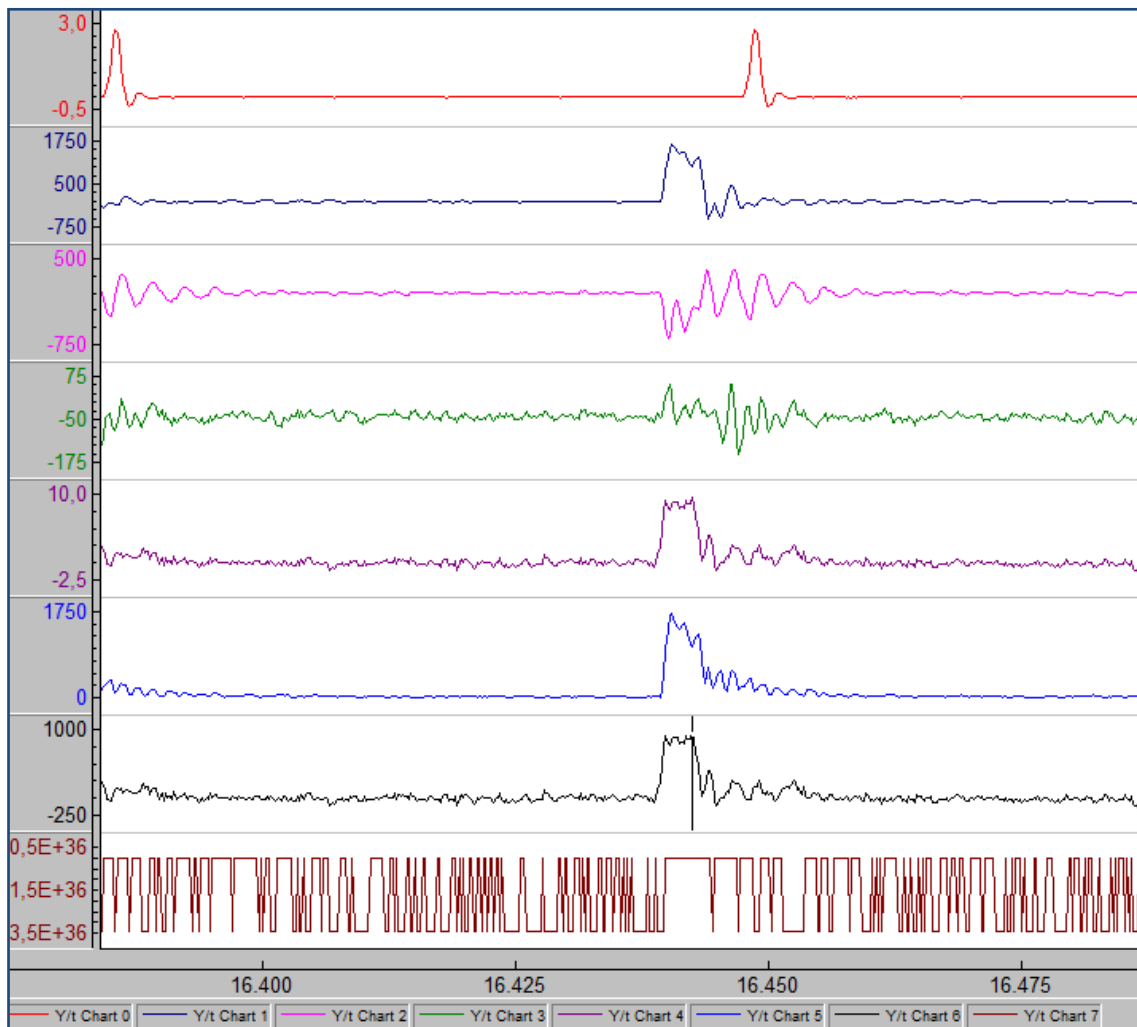


Imagen 61. Gráfica de la señal de los canales con respecto al tiempo

No importa que programa de mecanizado CNC utilicemos ni que velocidad de giro del husillo, ya que aunque varíe el período y la frecuencia, el ángulo β se mantiene constante.

Para determinarlo con mayor exactitud, hemos realizado una comparativa "señal-tiempo", entre la señal analógica que nos determina cuando comienza la fresa a rotar y el canal 1, que nos indica la fuerza medida por el dinamómetro en el eje X (podíamos haber elegido por ejemplo el canal 2 que nos expresa la fuerza tomada en el eje Y, o el canal 3 por decir otro, pero en realidad nos da lo mismo, ya que sólo nos interesa el tiempo de retraso entre ambas señales: la de referencia y la de mecanizado).

Hemos realizado el siguiente esquema que se muestra en la **Imagen 62**, donde se han utilizado dos módulos de filtro, para que no haya picos ni valles, y ser de este modo aún más precisos a la hora de determinar el tiempo de desfase entre ambas señales.

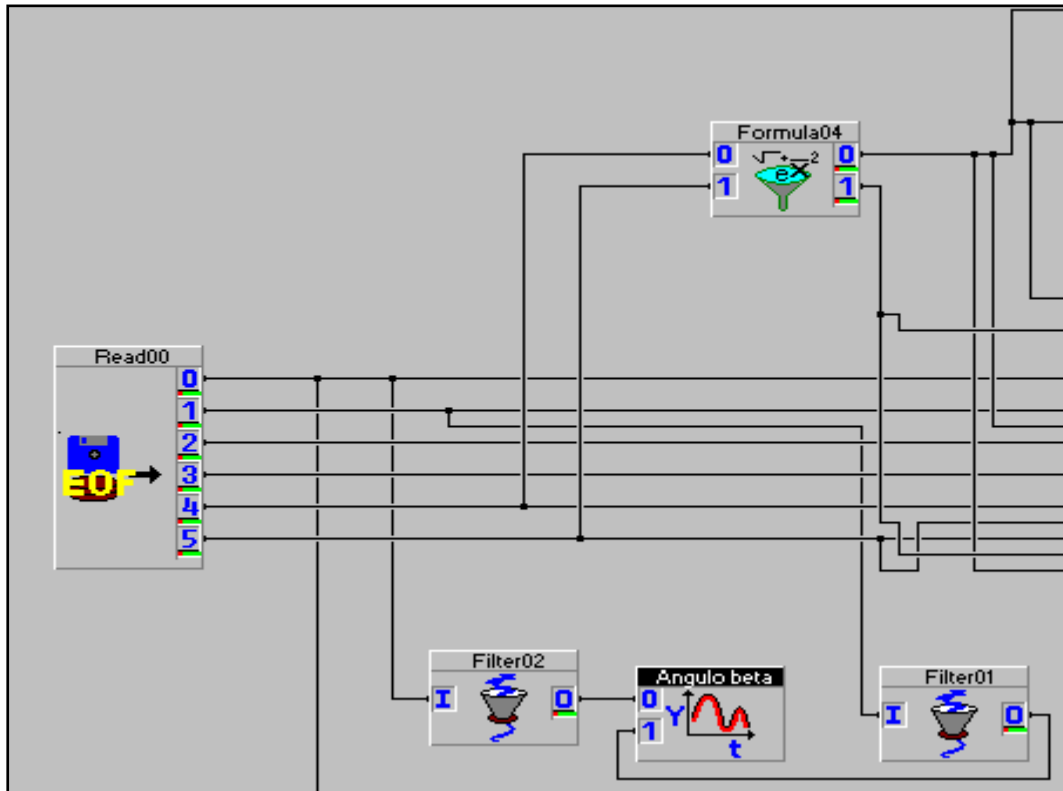


Imagen 62. Esquema realizado para determinar el desfase en el tiempo entre las señales del Canal 0 (señal analógica de referencia) y el Canal 1 (fuerza medida por el dinamómetro en el eje X)

Realizando el anterior esquema en el módulo "Worksheet" de DasyLab 8.0, obtenemos las gráficas que representamos en la **Imagen 63** :

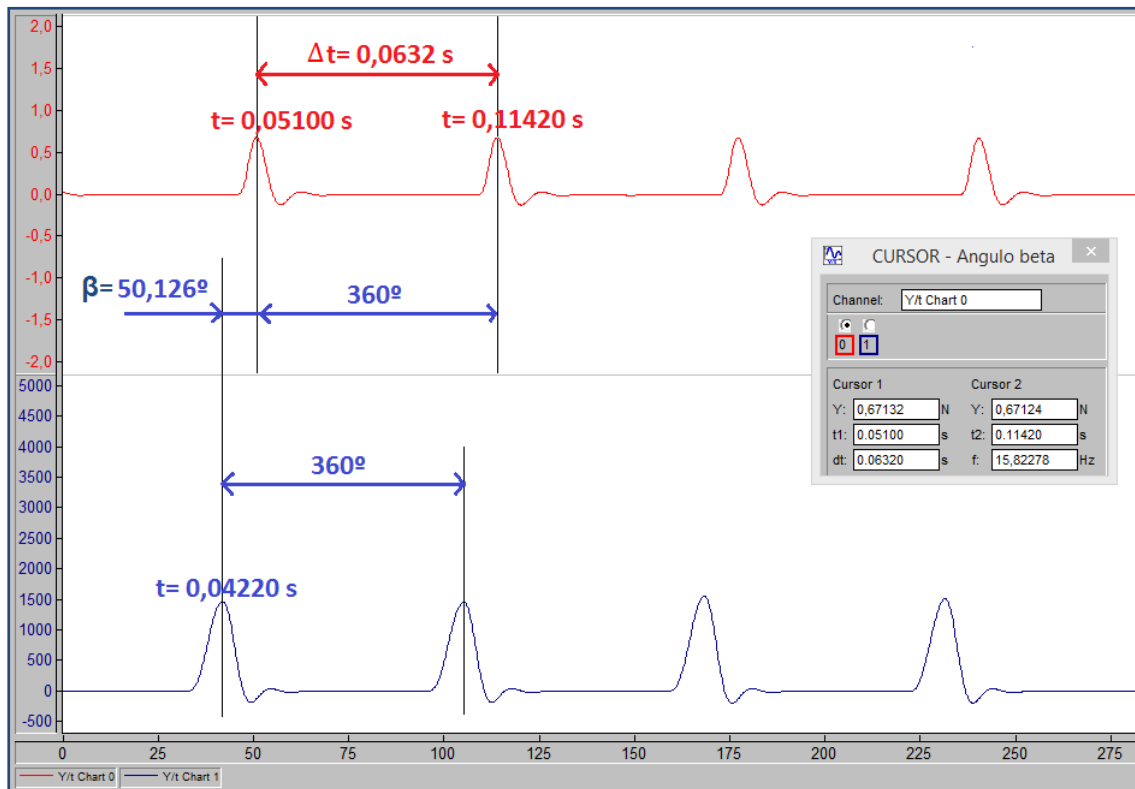


Imagen 63. Gráficas obtenidas de las señales analógica y señal de la fuerza medida por el dinamómetro en el eje X con respecto al tiempo

En la **Imagen 63** se puede observar el pulso de la señal analógica de referencia (en color rojo), y el pulso de la señal de la fuerza medida con el dinamómetro en el eje X (en color azul).

Ambas señales como hemos explicado antes, han sido filtradas con un filtro pasabajos con el objetivo de no tener tantas crestas y valles provocados por el ruido y factores externos, y de este modo aproximarnos más a la señal real.

Los picos de ambas señales están separados entre sí un período correspondiente al giro de la herramienta, es decir, 360° , o si lo expresamos en radianes, $2\cdot\pi$ radianes.

En este caso particular, se calcula la variación de tiempo entre dos pulsos máximos:

$\Delta t = 0,0632$ segundos, lo que le corresponde a un giro completo, es decir, 360° .



Ambas señales (la de referencia y la que nos proporciona el dinamómetro) están desfasadas un tiempo:

$$t = 0,0088 \text{ segundos}$$

De este modo ya podemos con las anteriores consideraciones, podemos establecer cuánto mide el ángulo de desfase β , correspondiéndole un valor:

$$\beta = 50,126^\circ$$

Conocido este ángulo β (constante durante todos los ensayos de mecanizado) ya podríamos determinar la fuerza de corte F_c y la fuerza radial F_r , conociendo simplemente las fuerzas que obtenemos a través del dinamómetro instalado:

Fuerza de corte:

$$\overline{F_c} = |\mathbf{TR}| \times \overline{F_x} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos 50,1216^\circ & \operatorname{sen} 50,1216^\circ & 0 \\ -\operatorname{sen} 50,1216^\circ & \cos 50,1216^\circ & 0 \\ 0,01 \cdot \operatorname{sen} 50,1216^\circ & 0,01 \cdot \cos 50,1216^\circ & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Fuerza radial:

$$\overline{F_r} = |\mathbf{TR}| \times \overline{F_y} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos 50,1216^\circ & \operatorname{sen} 50,1216^\circ & 0 \\ -\operatorname{sen} 50,1216^\circ & \cos 50,1216^\circ & 0 \\ 0,01 \cdot \operatorname{sen} 50,1216^\circ & 0,01 \cdot \cos 50,1216^\circ & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ F_y \\ 0 \end{pmatrix}$$

Una vez expresado el procedimiento seguido para calcular las fuerzas de mecanizado tomando como referencia la plaquita que mecaniza el material, vamos a continuar y finalizar explicando el último módulo fórmula con el que obtenemos la potencia de corte P_c en Watos (W).

En la **Imagen 64** adjunta a continuación, se muestra este módulo usado en el procedimiento de análisis y tratamiento de datos en el espacio de trabajo "Worksheet":

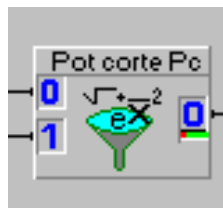


Imagen 64. Módulo fórmula usado para calcular la potencia de corte P_c .

Como podemos observar en la **Imagen 64**, tenemos 2 señales de entrada y una de salida. La señal de salida está conectada a un módulo gráfico de señal con respecto al tiempo, y un módulo "Digital Meter" para cuantificar el valor de dicha potencia de corte P_c .

La expresión utilizada para el cálculo de la potencia en DasyLab se muestra en la **Imagen 65**, captura correspondiente a la ventana de edición de este módulo de fórmula :

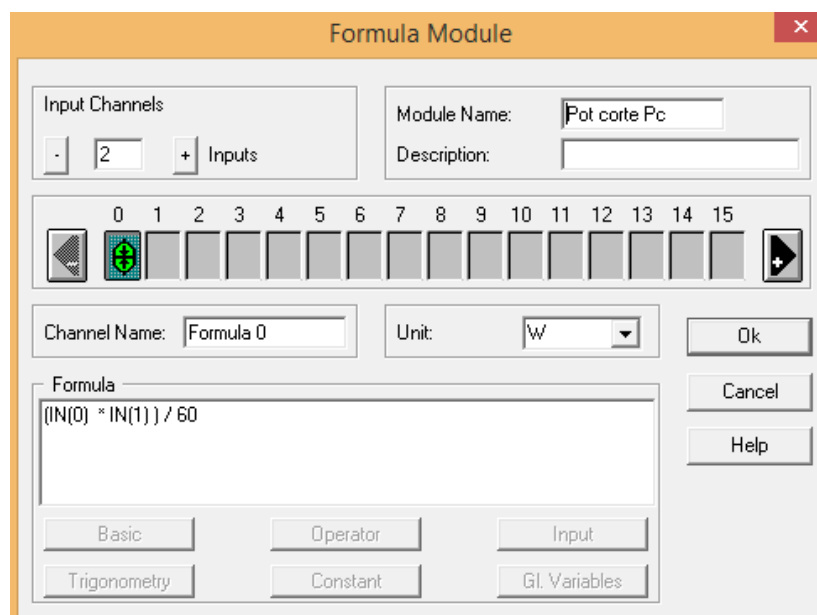


Imagen 65. Ventana de edición del módulo fórmula de la Potencia de corte



La expresión utilizada es la siguiente:

$$P_c = \frac{F_c (N) \times V_c \left(\frac{m}{min}\right)}{60 \left(\frac{s}{min}\right)}$$

Por último, tras haber explicado los módulos utilizados y los procedimientos seguidos para realizar el tratamiento de los datos adquiridos en el software DasyLab 8.0, sólo falta por mencionar, que en este sistema de análisis de datos también se ha usado un módulo de escritura con el objetivo de almacenar esos datos para un posible posterior uso con otro tipo de aplicaciones, como por ejemplo exportarlos a Excel para poder realizar las gráficas y las comparaciones que se deseen.



CAPÍTULO IV

Condiciones de trabajo y resultados





4. Condiciones de trabajo y resultados

Este apartado está dedicado a la exposición del trabajo realizado en el laboratorio y la muestra de los resultados obtenidos tras interpretar y analizar los mismos.

Se han realizado tres tipos de estudio:

- 1) Fuerzas y parámetros de corte: Mediante el dinamómetro instalado en la fresa que contiene la plaquita y realiza el mecanizado.
- 2) Análisis de rugosidad de las placas.
- 3) Estudio micrográfico de las placas mecanizadas con el objetivo de analizar su estado superficial después del fresado.

Ambos tres con la finalidad de caracterizar el comportamiento de placas de acero AISI 316L ASS al ser fresadas variando las velocidades de corte y avance por revolución de la herramienta, y mediante dos tipos de procedimiento de fresado:

- 1) Fresado en concordancia (DOWN milling)
- 2) Fresado en oposición (UP milling)

El objeto de este estudio es observar qué ventajas e inconvenientes presentan ambos métodos en este tipo de acero, ampliar el conocimiento sobre el fresado ortogonal y observar si experimentalmente se cumple lo que otros autores han expuesto acerca de este proceso o material.



4.1. Introducción

Comenzamos mostrando las condiciones de corte que fueron elegidas para el mecanizado de las placas.

Las placas fueron fresadas longitudinalmente, midiendo cada una de ellas 210 mm, por lo que se decidió que cada 25 mm se cambiarían las condiciones del corte, bien cambiando la velocidad de corte V_c (m/min) y así con ello la velocidad de giro de la fresa n (rpm), o variando el avance por revolución f_n (mm/rev) y así con ello f (mm/min).

Empezamos por mostrar las condiciones de corte para el fresado en oposición (UP milling).

Se fresaron dos placas con este procedimiento, tal y como se muestra en la Imagen 66 y en la Imagen 67.

Para el fresado en oposición del Programa 401, se pretendió elegir únicamente dos velocidades de corte (y así por tanto dos revoluciones de giro del husillo), y variar el avance por revolución de la herramienta y el avance de la mesa.

Se muestra en la Imagen 65 estas condiciones de mecanizado:

PROGRAMA 401 - UP milling			
n (rpm)	V_c (m/min)	f_n (mm/vuelta)	f (mm/min)
1476	100	0,1	146
1476	100	0,12	176
1476	100	0,15	220
1476	100	0,2	294
2196	150	0,1	220
2196	150	0,12	262
2196	150	0,15	330
2196	150	0,2	440

Imagen 66. Condiciones en el mecanizado de una de las dos placas fresadas con el procedimiento de fresado en oposición (UP milling)



Donde "Programa 401" indica el nombre que fue elegido para el programa CNC que se realizó para que trabajase la máquina fresadora teniendo en cuenta estos parámetros.

Este "Programa 401" en lenguaje máquina- herramienta CNC se muestra a continuación:

```
0 BEGIN PGM 401 MM
1 TOOL DEF 1 L+0,000 R+10,000
2 TOOL CALL 1 Z S 1476
3 L X-10,000 Y+0,000 Z+0,000 R0 F500 M03
4 L Y+5,000 R F50 M
5 L X+25,000 R F146 M
6 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
7 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
8 L X+50,000 R F176 M
9 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
10 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
11 L X+75,000 R F220 M
12 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
13 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
14 L X+100,000 R F294 M
15 L IX-2,000 IY-2,000 R F50 M
16 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
17 TOOL CALL 1 Z S 2196
18 L X+125,000 R F220 M
19 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
20 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
21 L X+150,000 R F262 M
22 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
23 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
24 L X+175,000 R F330 M
25 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
26 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
27 L X+200,000 R F440 M
28 L IX+2,000 Y-10,000 R F100 M02
29 END PGM 401 MM
```



Para el fresado en oposición del Programa 503 se eligen cuatro velocidades de corte V_c distintas (60 m/min, 100 m/min, 140 m/min, 180 m/min), y tan sólo se varía dos veces el avance por revolución de la herramienta (0,1 mm/rev, 0,15 mm/rev).

En la **Imagen 67** siguiente se muestran las condiciones de este mecanizado:

PROGRAMA 503 - UP milling			
n (rpm)	V_c (m/min)	f_n (mm/vuelta)	f (mm/min)
878	60	0,1	96
878	60	0,15	144
1476	100	0,1	146
1476	100	0,15	220
2050	140	0,1	222
2050	140	0,15	334
2635	180	0,1	286
2635	180	0,15	430

Imagen 67. Condiciones en el mecanizado de una de las dos placas fresadas con el procedimiento de fresado en oposición (UP milling)

"Programa 503" indica el nombre del programa CNC que se introdujo a la máquina fresadora para que realizase el mecanizado teniendo en cuenta estas condiciones de corte.



Este "Programa 503" en lenguaje máquina- herramienta CNC se muestra a continuación:

```
0 BEGIN PGM 503 MM
1 TOOL DEF 1 L+0,000 R+10,000
2 TOOL CALL 1 Z S 878
3 L X-10,000 Y+0,000 Z+0,000 R0 F500 M03
4 L Y+5,000 R F50 M
5 L X+25,000 R0 F96 M
6 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
7 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
8 L X+50,000 R F144 M
9 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
10 TOOL CALL 1 Z S 1476
11 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
12 L X+75,000 R F146 M
13 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
14 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
15 L X+100,000 R F220 M
16 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
17 TOOL CALL 1 Z S 2050
18 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
19 L X+125,000 R F222 M
20 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
21 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
22 L X+150,000 R F334 M
23 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
24 TOOL CALL 1 Z S 2635
25 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
26 L X+175,000 R F286 M
27 L IX-2,000 IY-2,000 R F M
28 L IX+2,000 IY+2,000 R F50 M
29 L X+200,000 R F430 M
30 L IX-2,000 IY-10,000 R F50 M02
31 END PGM 503 MM
```



Ahora se muestran las condiciones de corte para el fresado en concordancia (DOWN milling).

Se fresaron dos placas con este procedimiento, tal y como se muestra en la Imagen 68 y en la Imagen 69.

Para el fresado en oposición del Programa 501, se pretendió elegir únicamente dos velocidades de corte (y así por tanto dos revoluciones de giro del husillo), y variar el avance por revolución de la herramienta y el avance de la mesa.

Se muestra en la Imagen 35 estas condiciones de mecanizado:

PROGRAMA 501 - DOWN			
n (rpm)	Vc (m/min)	fn (mm/vuelta)	f (mm/min)
1476	100	0,1	146
1476	100	0,12	176
1476	100	0,15	220
1476	100	0,2	294
2196	150	0,1	220
2196	150	0,12	262
2196	150	0,15	330
2196	150	0,2	440

Imagen 68. Condiciones en el mecanizado de una de las dos placas fresadas con el procedimiento de fresado en concordancia (DOWN milling)

"Programa 501" indica el nombre del programa CNC que se introdujo a la máquina fresadora para que realizase el mecanizado teniendo en cuenta estas condiciones de corte.



Este "Programa 501" en lenguaje máquina- herramienta CNC se muestra a continuación:

```
0 BEGIN PGM 501 MM
1 TOOL DEF 1 L+0,000 R+10,000
2 TOOL CALL 1 Z S 1476
3 L X+240,000 Y+0,000 Z+0,000 R0 F500 M03
4 L Y+5,000 R F50 M
5 L X+205,000 R F146 M
6 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
7 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
8 L X+180,000 R F176 M
9 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
10 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
11 L X+155,000 R F220 M
12 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
13 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
14 L X+130,000 R F294 M
15 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
16 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
17 TOOL CALL 1 Z S 2196
18 L X+105,000 R F220 M
19 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
20 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
21 L X+80,000 R F262 M
22 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
23 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
24 L X+55,000 R F330 M
25 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
26 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
27 L X+30,000 R F440 M
28 L IX-2,000 Y-10,000 R F50 M02
29 END PGM 501 MM
```



Para el fresado en concordancia del Programa 502 se eligen cuatro velocidades de corte V_c distintas (60 m/min, 100 m/min, 140 m/min, 180 m/min), y tan sólo se varía dos veces el avance por revolución de la herramienta (0,1 mm/rev, 0,15 mm/rev).

En la **Imagen 69** siguiente se muestran las condiciones de este mecanizado:

PROGRAMA 502 - DOWN			
n (rpm)	V_c (m/min)	f_n (mm/vuelta)	f (mm/min)
878	60	0,1	96
878	60	0,15	144
1476	100	0,1	146
1476	100	0,15	220
2050	140	0,1	222
2050	140	0,15	334
2635	180	0,1	286
2635	180	0,15	430

Imagen 69. Condiciones en el mecanizado de una de las dos placas fresadas con el procedimiento de fresado en concordancia (DOWN milling)

"Programa 502" indica el nombre del programa CNC que se introdujo a la máquina fresadora para que realizase el mecanizado teniendo en cuenta estas condiciones de corte.



Este "Programa 502" en lenguaje máquina- herramienta CNC se muestra a continuación:

```
0 BEGIN PGM 502 MM
1 TOOL DEF 1 L+0,000 R+10,000
2 TOOL CALL 1 Z S 878
3 L X+240,000 Y+0,000 Z+0,000 R0 F500 M03
4 L Y+5,000 R F50 M
5 L X+205,000 R0 F96 M
6 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
7 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
8 L X+180,000 R F144 M
9 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
10 TOOL CALL 1 Z S 1476
11 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
12 L X+155,000 R F146 M
13 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
14 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
15 L X+130,000 R F220 M
16 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
17 TOOL CALL 1 Z S 2050
18 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
19 L X+105,000 R F222 M
20 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
21 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
22 L X+80,000 R F334 M
23 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
24 TOOL CALL 1 Z S 2635
25 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
26 L X+55,000 R F286 M
27 L IX+2,000 IY-2,000 R F M
28 L IX-2,000 IY+2,000 R F50 M
29 L X+30,000 R F430 M
30 L IX+2,000 IY-10,000 R F50 M02
31 END PGM 502 MM
```

4.2. Fuerzas de corte

Empezamos por presentar las gráficas obtenidas a través del software DasyLab 8.0 habiendo realizado como se ha explicado en el apartado anterior "Cadena de Medida", un sistema de tratamiento y análisis de datos.

En este apartado 4 "Condiciones de trabajo y resultados" se van a dar conocer y comparar los resultados de los ensayos para los diferentes programas CNC, particularizando para las distintas condiciones de mecanizado seguidas.

Se van a presentar los resultados relativos a:

- Fuerzas de corte
- Potencias de corte

Vamos a comparar qué ocurre para los dos tipos de fresado, en concordancia (DOWN milling) y en oposición (UP milling), siguiendo las condiciones del mecanizado de los programas CNC de la fresadora.

Empezamos mostrando en la **Imagen 70** los resultados de ambos métodos combinados en la misma gráfica, donde se representa la fuerza de corte F_c y la fuerza resultante R , (combinación de la fuerza radial F_r y de la propia fuerza de corte F_c) con respecto al tiempo.

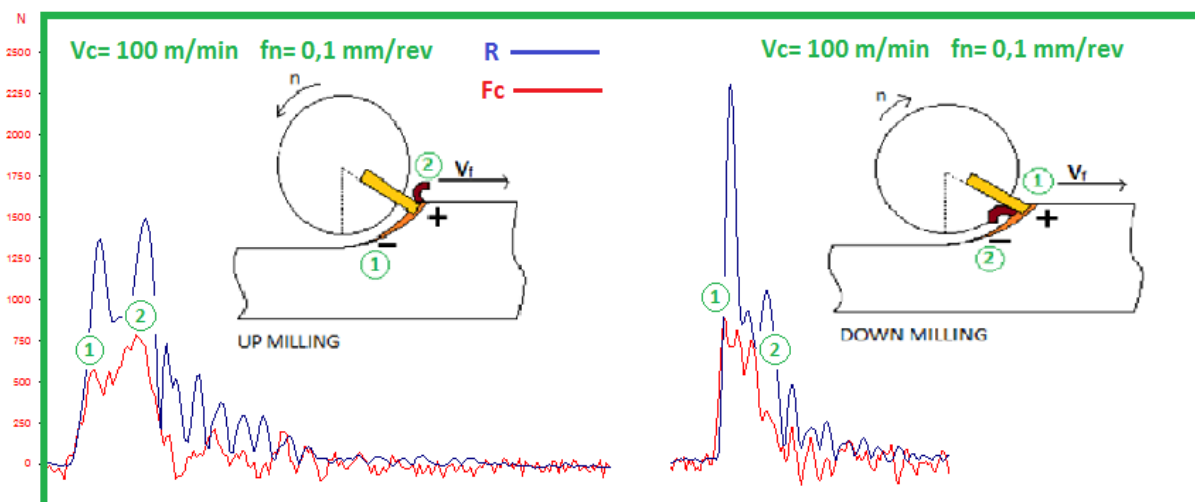


Imagen 70. Comparación entre fuerzas de corte (F_c) y fuerzas resultantes (R) para: Fresado en oposición (UP milling) vs. Fresado en concordancia (DOWN milling) para unas condiciones de mecanizado: $V_c= 100$ m/min, $f_n= 0,1$ mm/rev



En la **Imagen 70** se puede observar como el espesor de viruta es un factor que guarda una importante relación con la fuerza de corte F_c , y por tanto con la fuerza resultante R .

En el fresado en oposición (UP milling) como se puede observar, el espesor de viruta que es cortada va de menor a mayor espesor, este hecho, queda reflejado en la gráfica de la fuerza de corte F_c como se refleja en la representación de la **Imagen 70**, siendo la fuerza de corte en el punto 2 mayor que la fuerza de corte en el punto 1.

En el fresado en concordancia (DOWN milling), la fuerza de corte en el punto 1 es mayor que la fuerza de corte en el punto 2, como se observa en la **Imagen 70**, este hecho obviamente guarda relación con el espesor de viruta cortado, ya que en el caso de fresado en concordancia la fresa mecaniza de mayor a menor espesor.

La fuerza resultante R también se ve afectada por este factor del espesor de viruta mecanizado como se puede observar en la **Imagen 70**. En el fresado en oposición hay un primer pico que está acompañado de una caída en el valor de la fuerza para posteriormente hacer un repunte volviendo a alcanzar otro máximo. En el fresado en concordancia hay un máximo al que le corresponde un espesor de viruta también máximo, y después disminuye la fuerza, habiendo sólo un máximo relativo cuando la plaquita acaba de mecanizar el material.

Después del mecanizado, tanto en fresado en oposición como en concordancia, la fuerza es amortiguada hasta llegar aproximadamente a 0 Newton, aunque no es del todo estable la señal debido al ruido y a factores externos al proceso.

También es reseñable al observar la **Imagen 70**, que nos representa el valor de las fuerzas en Newton con respecto al tiempo de mecanizado, que el valor alcanzado en la fuerza resultante R es claramente superior en el caso de fresado en concordancia (DOWN milling).

Ahora vamos a mostrar la gráfica de la potencia consumida durante el mecanizado con respecto al tiempo en estas mismas condiciones de fresado, para comparar ambos métodos.

La **Imagen 71** nos muestra estos resultados:

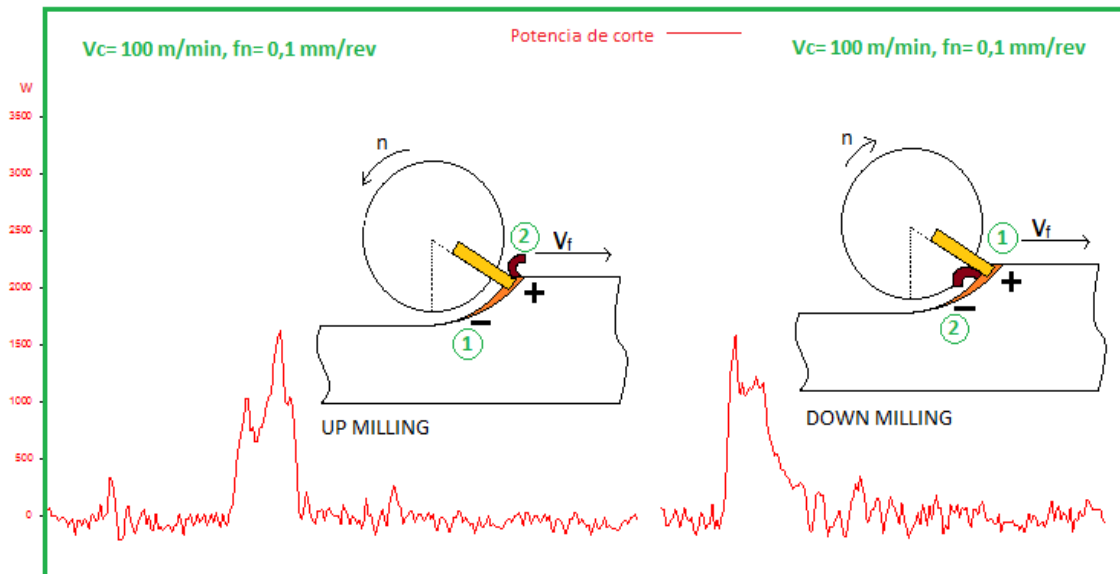


Imagen 71. Comparación entre potencias de corte (P_c) para: Fresado en oposición (UP milling) vs. Fresado en concordancia (DOWN milling) para unas condiciones de mecanizado: $V_c = 100$ m/min, $f_n = 0,1$ mm/rev

Como se puede observar en la **Imagen 71** esta gráfica de potencias de corte (P_c) es proporcional a la gráfica que representaba las fuerzas de corte (F_c), ya que ambas son proporcionales, debido a que la potencia de corte P_c se ha calculado como:

$$P_c (W) = \frac{F_c (N) \times V_c (m/min)}{60 (min/s)}$$

Y como ambas gráficas en la **Imagen 71** de fresado en concordancia (DOWN milling) y en oposición (UP milling) se han representado para una velocidad de corte $V_c = 100$ (m/min), la gráfica de la potencia de corte en este caso queda:

$$P_c (W) = F_c (N) \times 1,67 (m \cdot s)$$

Al margen de este hecho, lo que se puede observar en ambas gráficas de la **Imagen 71** es que la potencia de corte en el fresado en oposición es máxima en el punto 2, es decir, cuando la herramienta está mecanizando la parte donde la viruta es mayor, es decir, al final de la pasada de la plaquita. Sin embargo, en el fresado en concordancia, la potencia de corte es máxima en la zona de entrada de la fresa en el material, es decir, en el punto 1, donde también el espesor de la viruta es máximo.

Vamos ahora a ver qué sucede a las fuerzas cuando para la misma velocidad de corte $V_c=100$ m/min, aumentamos el avance por revolución.

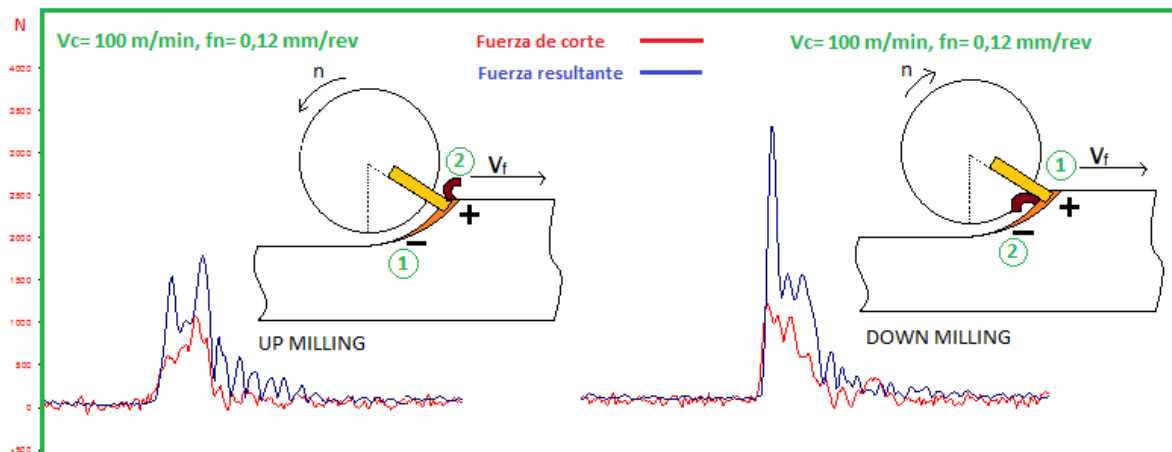


Imagen 72. Comparación entre fuerzas de corte (F_c) y fuerzas resultantes (R) para: Fresado en oposición (UP milling) vs. Fresado en concordancia (DOWN milling) para unas condiciones de mecanizado: $V_c= 100$ m/min, $f_n= 0,12$ mm/rev

En cuanto a forma de la señal no destacamos novedades con respecto a la que setenía en la **Imagen 70** para un avance por revolución menor.

Lo que si podemos observar es que al aumentar el avance por revolución f_n (mm/rev) se aumenta el valor de las fuerza de corte F_c y la fuerza resultante R . Es decir podemos afirmar que:

$$\uparrow f_n \quad \uparrow F_c \quad \uparrow R$$

Con el fin de observar esta relación de que al aumentar el avance por revolución se aumentan las fuerzas de corte, mostramos la siguiente **Imagen 73** donde se muestra para la misma velocidad de corte, un aumento progresivo de los avances por revolución. El procedimiento de fresado es en oposición (UP milling):

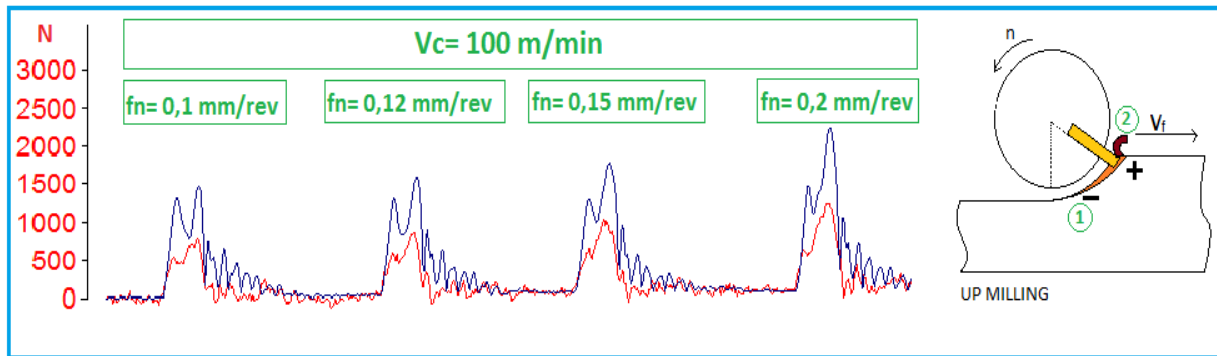


Imagen 73. Comparación entre fuerzas de corte (F_c en rojo) y fuerzas resultantes (R en azul) para: Fresado en oposición (UP milling) con unas condiciones de mecanizado: $V_c=100$ m/min, y aumentando los avances por revolución progresivamente de izquierda a derecha

Como se puede observar en la **Imagen 73**, a medida que aumenta el avance por revolución de la fresa (mm/rev), las fuerzas de corte F_c y resultante R aumentan a su vez.

También análogamente al considerar la dependencia de la potencia de corte a la fuerza de corte, podemos decir que al aumentar el avance por revolución de la herramienta, la potencia necesaria para el mecanizado también aumenta:

$$\uparrow f_n \quad \uparrow P_c$$

En la siguiente **Imagen 74** se muestra la variación de las gráficas de la fuerza de corte y la fuerza resultante ante el aumento progresivo del avance por revolución pero con un procedimiento de fresado en concordancia (**DOWN milling**):

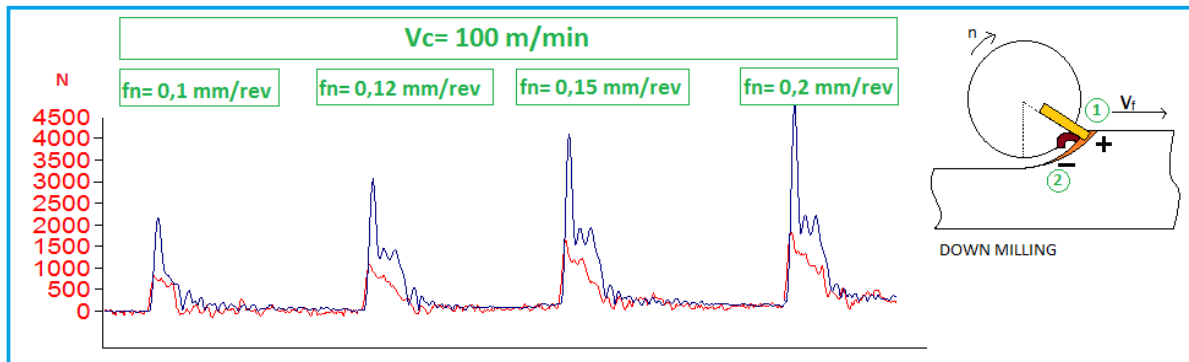


Imagen 74. Comparación entre fuerzas de corte (F_c en rojo) y fuerzas resultantes (R en azul) para: Fresado en concordancia (**DOWN milling**) con unas condiciones de mecanizado: $V_c=100$ m/min, y aumentando los avances por revolución progresivamente de izquierda a derecha

En la **Imagen 74** se puede interpretar como para un fresado en concordancia (**DOWN milling**), manteniendo la velocidad de corte constante, con un aumento del avance por revolución en la fresa, aumentan las fuerzas de corte y fuerzas resultantes, al igual que ocurría en el fresado en oposición (**UP milling**).

La diferencia entre ambos métodos de fresado es que al aumentar el avance por revolución de la herramienta, las fuerzas en el fresado en concordancia (**DOWN milling**) aumentan mucho más rápido que las fuerzas de mecanizado en el método de fresado en oposición (**UP milling**).

Los resultados obtenidos para la fuerza de corte son análogos para la potencia de corte, por tanto según se aumenta el avance por revolución también lo debe hacer la potencia necesaria en la máquina.

Ahora vamos a estudiar qué ocurre en los dos procedimientos de fresado cuando aumentamos la velocidad de corte manteniendo constante el avance por revolución.

Empezamos por estudiar este hecho con un procedimiento de fresado en concordancia (DOWN milling).

Vamos a mantener el avance por revolución constante a $f_n = 0,1$ mm/rev y ver lo que sucede en las gráficas de fuerza de corte y fuerza resultante cuando se varía la velocidad de corte un valor de 50 m/min. Haremos exactamente lo mismo para un avance por revolución de 0,2 mm/rev. En la **Imagen 75** adjunta a continuación, mostramos los resultados obtenidos:

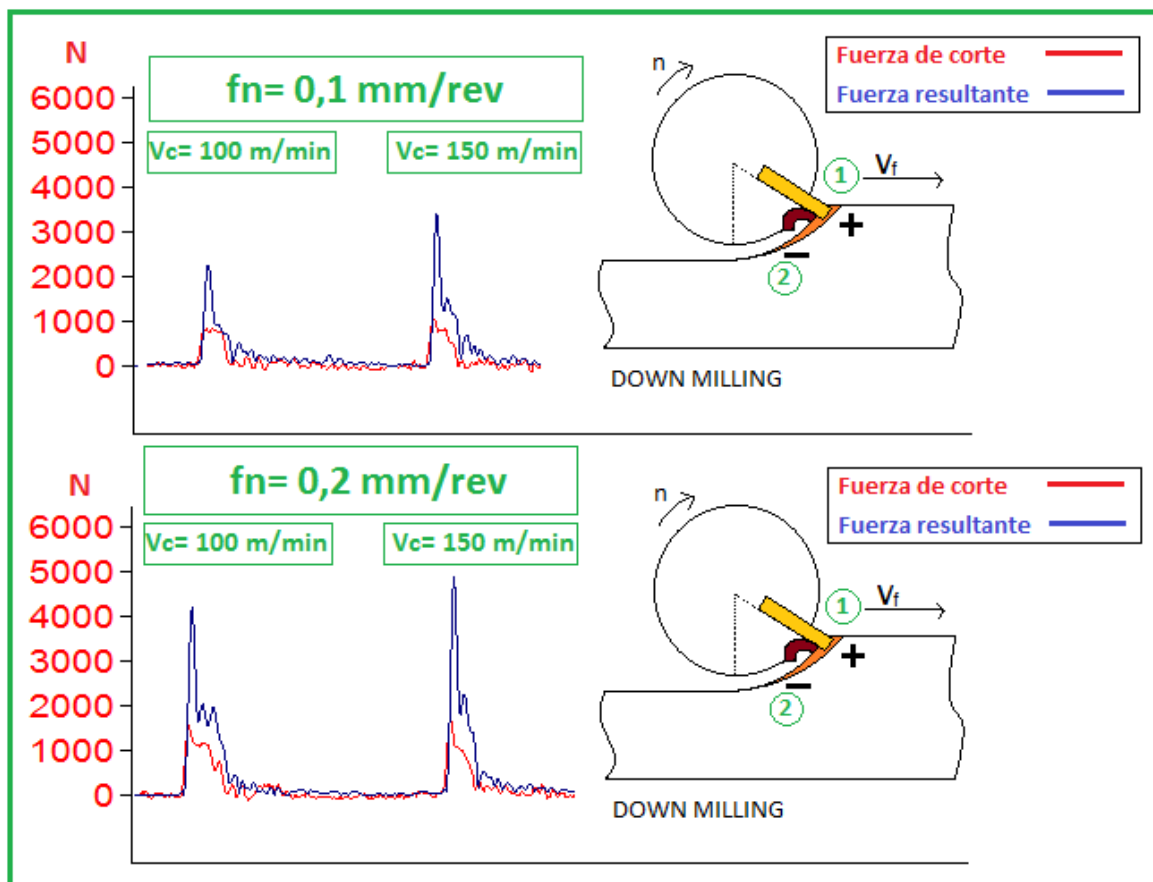


Imagen 75. Comparación entre fuerzas de corte (F_c) y fuerzas resultantes (R) para: Fresado en concordancia (DOWN milling) con unas condiciones de mecanizado: $f_n = 0,1$ mm/rev y aumentando la velocidad de corte pasando de 100 (m/min) a 150 (m/min). En la parte inferior haciendo la misma variación de velocidad de corte, pero para un avance por revolución de 0,2 mm/rev



Observamos en la **Imagen 75** cómo aumentar la velocidad de corte V_c supone claramente aumentar la fuerza R resultante en el mecanizado para un fresado en concordancia (DOWN milling).

Con respecto a aumentar la velocidad de corte, manteniendo constante el avance por revolución de la herramienta, no tenemos una evidencia clara del comportamiento que le ocurre a la fuerza de corte F_c , por tanto, vamos a esperar a trabajar con valores numéricos.

Lo que sí que es evidente y queda demostrado, es la siguiente relación:

↑ V_c ↑ R

Vamos a hacer el mismo estudio que se ha hecho en la **Imagen 75**, pero para fresado en oposición (UP milling).

En la **Imagen 76** mostrada a continuación se estudia cómo afecta a la gráfica de fuerzas de mecanizado, un aumento de la velocidad de corte manteniendo el avance por revolución constante utilizando un fresado en oposición (UP milling):

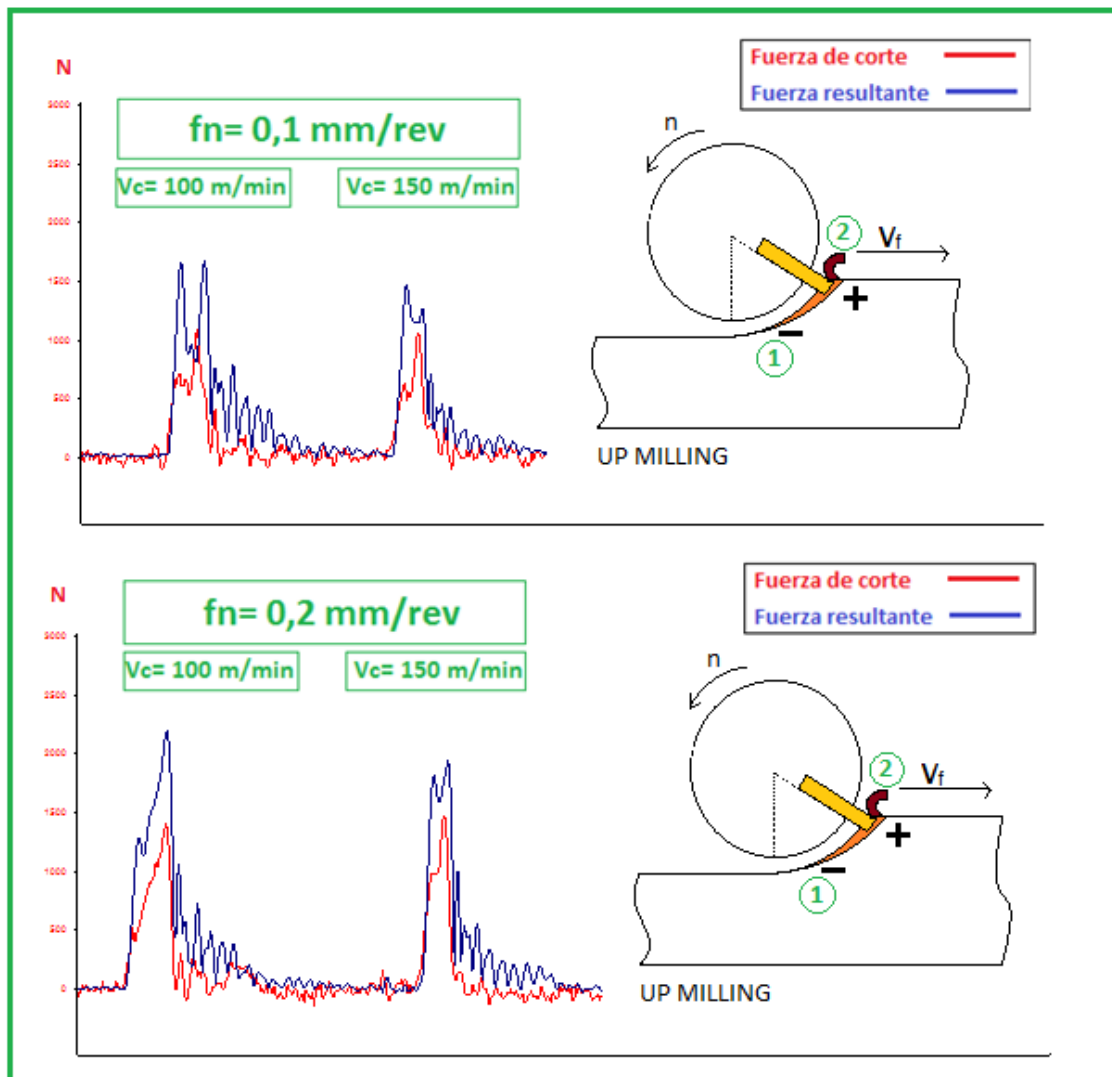


Imagen 76. Comparación entre fuerzas de corte (F_c) y fuerzas resultantes (R) para: Fresado en oposición (UP milling) con unas condiciones de mecanizado: $f_n = 0,1 \text{ mm/rev}$ y aumentando la velocidad de corte pasando de 100 (m/min) a 150 (m/min). En la parte inferior haciendo la misma variación de velocidad de corte, pero para un avance por revolución de 0,2 mm/rev

Para un avance por revolución constante y aumentado la velocidad de corte de 100 (m/min) a 150 (m/min) en un fresado en oposición (UP milling) se sacan resultados sorprendentes en comparación con lo que ocurría con el fresado en concordancia.

Bien, lo que se observa es que manteniendo el avance por revolución constante y aumentando la velocidad de corte, no sólo no aumenta la fuerza resultante R en el mecanizado, si no que ésta disminuye ligeramente.



Pudiendo llegar a la siguiente conclusión para fresado en oposición (UP milling):

$$\uparrow V_c \quad \downarrow R$$

Manteniendo eso sí, el avance por revolución $f_n = \text{cte}$

Con respecto a la fuerza de corte F_c no podemos aún determinar exactamente lo que ocurre cuando se aumenta la velocidad de corte manteniendo constante el avance por revolución, así que esperamos a analizar los valores numéricos obtenidos.

Para determinar el comportamiento de la potencia de corte, hay que conocer con seguridad el comportamiento que sigue la fuerza de corte debido a la relación dependiente de ambos parámetros.

A continuación vamos a continuar este estudio de fuerzas de mecanizado para este acero 316L ASS mostrando numérica y gráficamente los valores máximos alcanzados en las fuerzas y potencias de mecanizado para las distintas condiciones de corte llevadas a cabo en este estudio y de este modo también verificar los resultados obtenidos previamente observando el comportamiento de las gráficas.

Comenzamos por representar los valores máximos alcanzados para la fuerza de corte F_c , la fuerza resultante R y la potencia de corte necesaria para efectuar el mecanizado P_c . Estos valores han sido obtenidos a través de DasyLab con un filtrado de valores máximos.

Mostramos estos resultados en la **Tabla 13** para el fresado en oposición (UP milling):



Fresado en oposición (UP milling)

n (rpm)	Vc (m/min)	fn (mm/rev)	f (mm/min)	Fc (N)	R (N)	Pc (W)
878	60	0,1	96	1387	2184	1387
878	60	0,15	144	1758	2437	1758
1476	100	0,1	146	1209	1820	2015
1476	100	0,12	176	1356	1894	2260
1476	100	0,15	220	1514	2279	2523
1476	100	0,2	294	1791	2547	2985
2050	140	0,1	222	1179	1668	2751
2050	140	0,15	334	1477	2114	3446
2196	150	0,1	220	1152	1605	2880
2196	150	0,12	262	1324	1615	3310
2196	150	0,15	330	1417	2087	3543
2196	150	0,2	440	1589	2444	3973
2635	180	0,1	286	984	1593	2952
2635	180	0,15	430	1298	2105	3894

Datos parámetros mecanizado

Valores máximos obtenidos en el ensayo

Tabla 13. Valores máximos obtenidos, filtrados con DasyLab correspondientes a fresado en oposición para: Fuerza de corte Fc, Fuerza resultante R, Potencia de corte Pc

Analizando estos datos obtenidos, anticipándonos a representarlos para verlo visualmente más claro, podemos ya obtener los resultados que buscábamos referentes al comportamiento de la fuerza de corte cuando se aumenta la velocidad de corte manteniendo fijo el avance por revolución de la fresa.

Se puede afirmar con certeza, a la vista de los resultados mostrados en la **Tabla 13**, que conforme aumenta la velocidad de corte V_c (m/min) manteniendo constante el avance por revolución f_n (mm/rev), la fuerza de corte disminuye. Así pues se cumple la siguiente relación:

↑ V_c ↓ F_c

La potencia de corte P_c , por el contrario sí que aumenta con el incremento de la velocidad de corte, ya que aunque disminuya la fuerza de corte, el aumento de la velocidad de corte, hace que la potencia aumente a su vez.



Recordemos la expresión que rige la potencia de corte:

$$P_c (W) = \frac{F_c (N) \times V_c (m/min)}{60 (min/s)}$$

Por tanto se cumple en fresado en oposición (UP milling):

↑ V_c ↑ P_c

Hacemos lo propio con los valores máximos obtenidos correspondientes a fuerza de corte, fuerza resultante y potencia de corte, para el procedimiento de fresado en concordancia (DOWN milling). Véase **Tabla 14**:

Fresado en concordancia (DOWN milling)						
n (rpm)	V_c (m/min)	f_n (mm/rev)	f (mm/min)	F_c (N)	R (N)	P_c (W)
878	60	0,1	96	1260	2903	1260
878	60	0,15	144	1510	4051	1510
1476	100	0,1	146	1296	4197	2160
1476	100	0,12	176	1374	4368	2290
1476	100	0,15	220	1544	4620	2573
1476	100	0,2	294	1731	4901	2885
2050	140	0,1	222	1380	4300	3220
2050	140	0,15	334	1579	4887	3684
2196	150	0,1	220	1393	4326	3483
2196	150	0,12	262	1426	4615	3565
2196	150	0,15	330	1589	4932	3973
2196	150	0,2	440	1753	5200	4383
2635	180	0,1	286	1652	4685	4956
2635	180	0,15	430	1913	4979	5739

Tabla 14. Valores máximos obtenidos, filtrados con DasyLab correspondientes a fresado en concordancia para: Fuerza de corte F_c , Fuerza resultante R, Potencia de corte P_c

Analizando los resultados obtenidos fijándonos en la Tabla 14, ya podemos determinar el comportamiento que presenta la fuerza de corte conforme aumenta la velocidad de corte y se mantiene constante el avance por revolución.

Se observa que a medida que aumenta la velocidad de corte, la fuerza de corte también es mayor, con lo cual podemos establecer para fresado en concordancia:

$$\uparrow V_c \quad \uparrow F_c$$

Y del mismo modo, al aumentar la velocidad de corte en el fresado en concordancia (DOWN milling) también aumenta la potencia de corte, así pues:

$$\uparrow V_c \quad \uparrow P_c$$

A continuación vamos a mostrar una serie de gráficos donde lo que se pretende es dejar aún más claro los resultados que se han obtenido realizando los ensayos de laboratorio.

Mostramos a continuación en la **Imagen 77** una comparativa entre ambos métodos de fresado, donde se observa el comportamiento de la fuerza de corte cuando se mantiene constante el avance por revolución $f_n = 0,1$ (mm/rev) y se aumenta progresivamente la velocidad de corte:

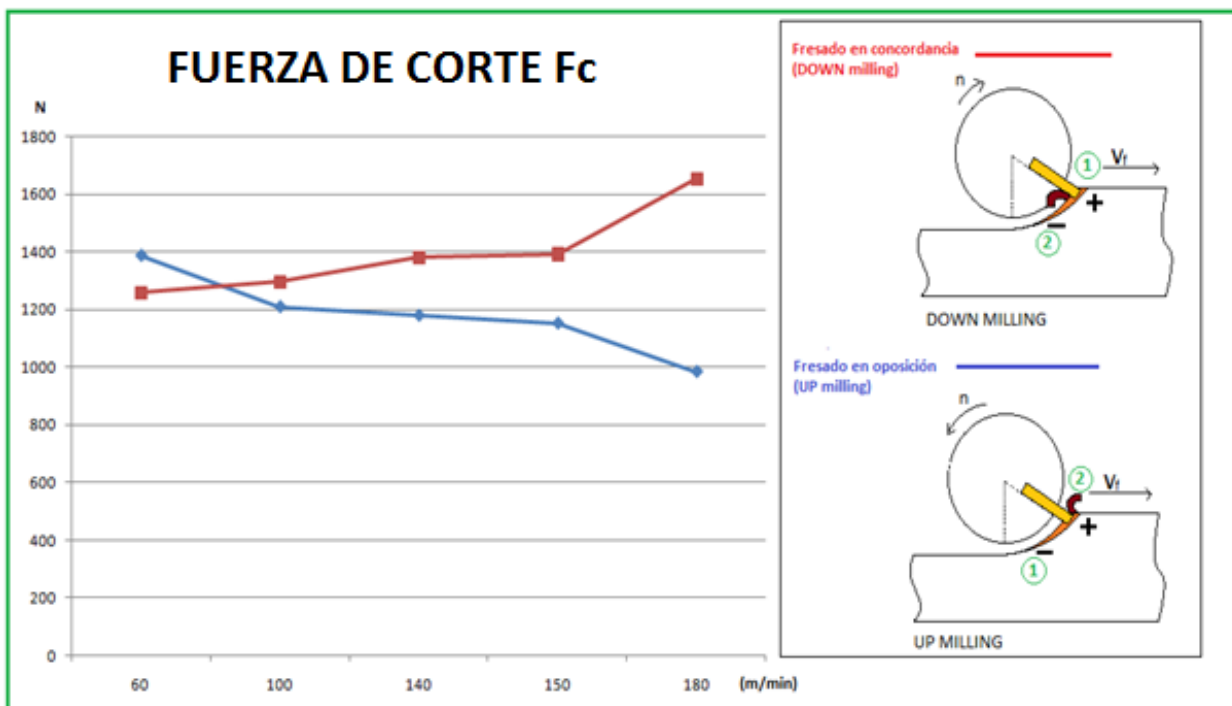


Imagen 77. Fuerzas de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $f_n = 0,1$ (mm/rev) y variando la velocidad de corte

En esta **Imagen 77** se puede observar más claramente como los resultados que enunciábamos antes que se cumplían, son totalmente ciertos. Es decir, el comportamiento de la fuerza de corte conforme aumenta la velocidad de corte y se mantiene constante el avance por revolución ($f_n = 0,1$ mm/rev) de la fresa para fresado en oposición y en concordancia es muy diferente, ya que conforme aumenta la velocidad de corte para el fresado en concordancia (DOWN milling) la fuerza de corte continua aumentando, todo lo contrario de lo que ocurre para fresado en oposición (UP milling), donde la fuerza de corte disminuye.

Ahora vamos a mostrar en la **Imagen 78** una comparación para ambos métodos, del comportamiento de la fuerza resultante R conforme aumenta la velocidad de corte y se mantiene constante el avance por revolución de la herramienta:

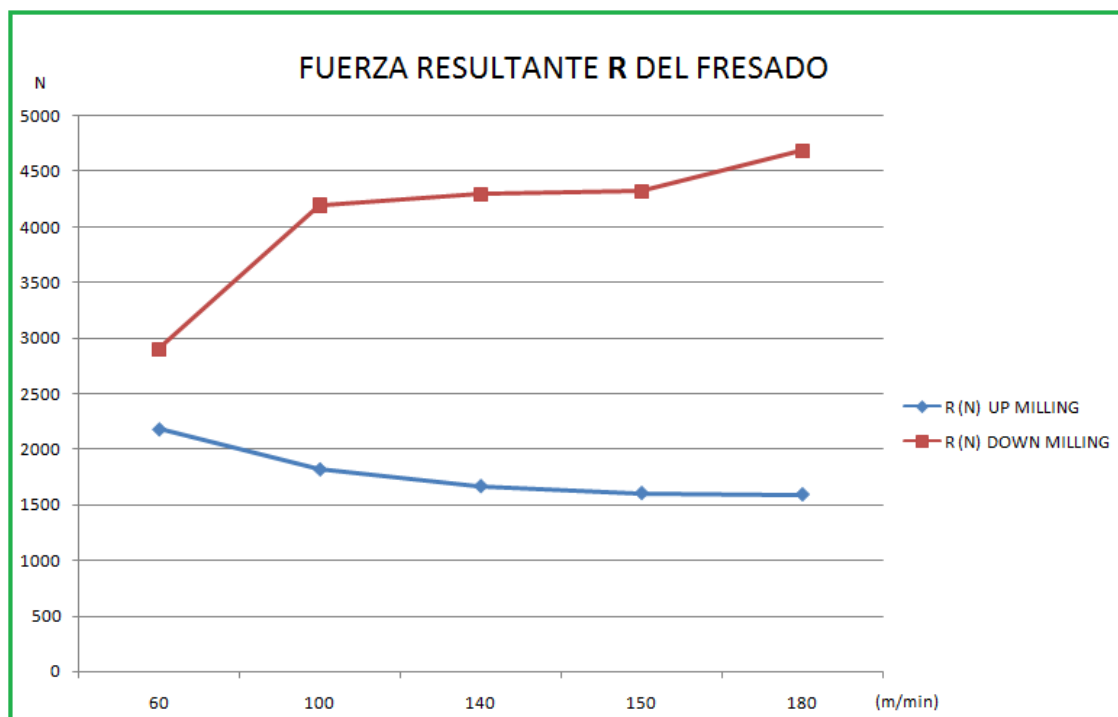


Imagen 78. Fuerzas resultante R para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $f_n = 0,1$ (mm/rev) y variando la velocidad de corte

Se observa en esta **Imagen 78** la misma tendencia que ocurriría para la fuerza de corte. En el fresado en oposición (UP milling) la fuerza resultante es menor conforme aumenta la velocidad de corte para un mismo avance por revolución ($f_n = 0,1$ mm/rev). Todo lo contrario ocurre en el fresado en concordancia (DOWN milling).

Vamos a estudiar a continuación qué ocurre con la potencia de corte cuando se mantiene constante el avance por revolución ($f_n = 0,1$ mm/rev) y se aumenta la velocidad de corte progresivamente.

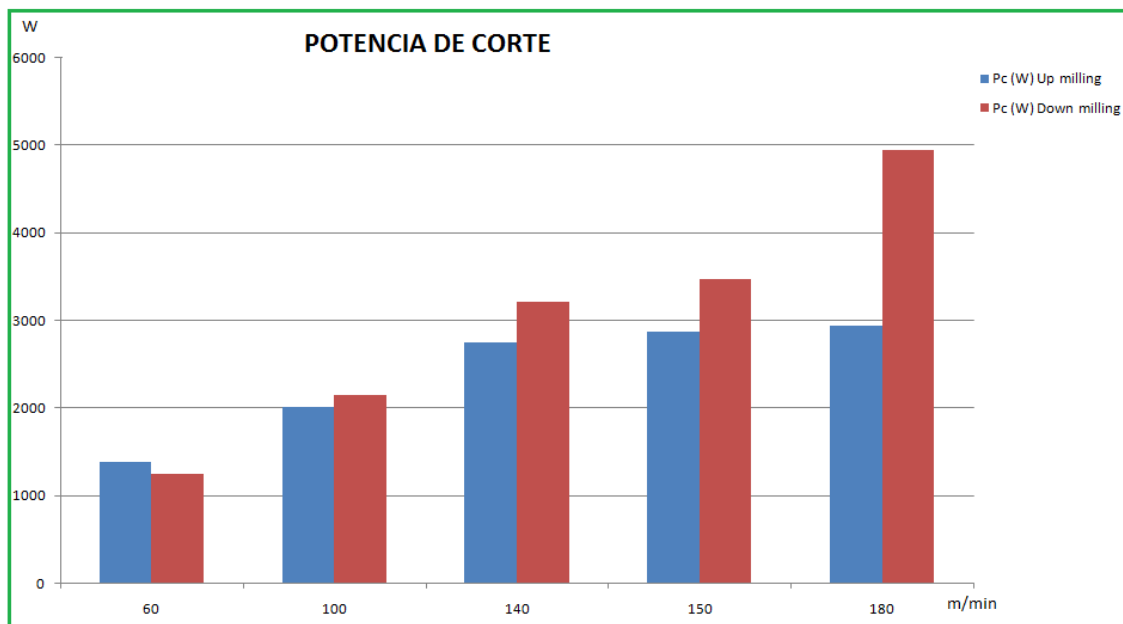


Imagen 79. Potencia de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $f_n = 0,10$ (mm/rev) y variando la velocidad de corte

Se puede observar en la Imagen 79 como a medida que aumenta la velocidad de corte, existe una mayor diferencia de la potencia consumida en el mecanizado entre el fresado en oposición (UP milling) y el fresado en concordancia (DOWN milling), siendo mayor la potencia consumida en el fresado en concordancia.

Vamos a observar estos mismos resultados del estudio de la potencia de corte que consume la máquina fresadora, pero ahora con un avance aunque también constante, pero mayor. El avance elegido ahora es $f_n = 0,15$ (mm/rev), y la velocidad de corte como en el caso anterior, aumenta progresivamente.

Se muestra este comportamiento en la **Imagen 80**:

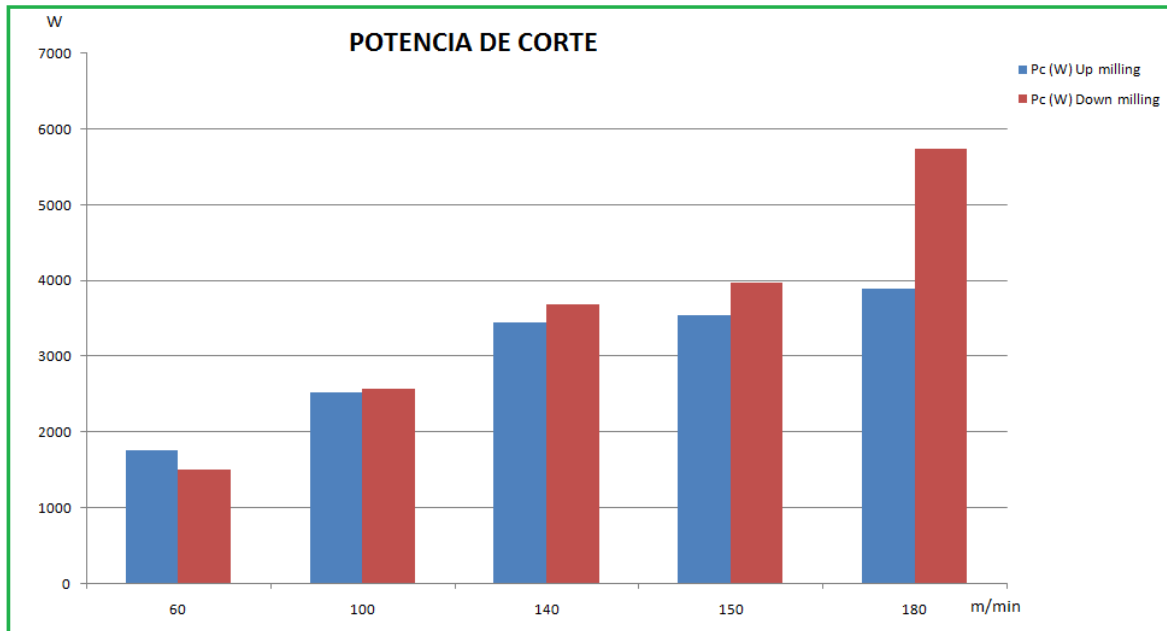


Imagen 80. Potencia de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $f_n = 0,15$ (mm/rev) y variando la velocidad de corte

A la vista de esta **Imagen 80** con un avance constante de valor $f_n = 0,1$ (mm/rev), el comportamiento es exactamente el mismo que el que se mostraba anteriormente en la **Imagen 79**, cuanto mayor es la velocidad de corte mayor es la diferencia en la potencia consumida por ambos métodos.

Lo que sí que se puede observar en esta **Imagen 80** con respecto a la **Imagen 79**, es que para exactamente las mismas velocidades de corte, aumentar el avance por revolución hace que se aumenta el valor de la potencia consumida para ambos métodos de fresado (en concordancia y en oposición).

Vamos a ver este hecho más claramente en la **Imagen 81** que se representa a continuación, donde se fija una velocidad de corte constante, y se aumenta el avance por revolución en $0,1$ (mm/rev), con el propósito de comparar el valor de la potencia consumida por la máquina fresadora en ambos casos.

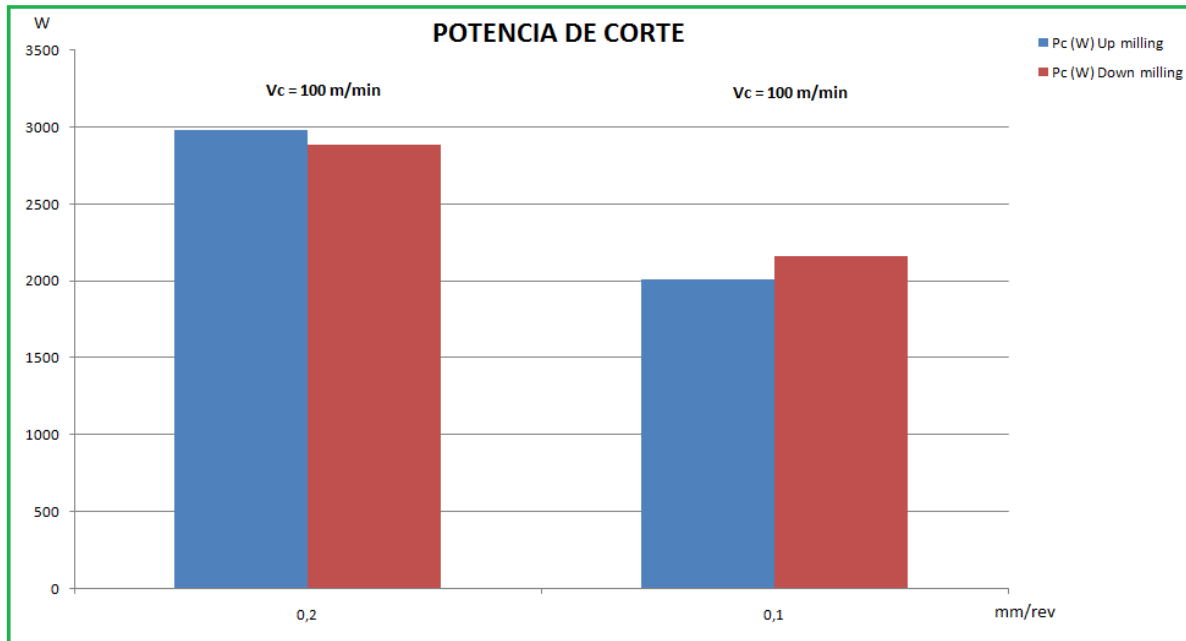


Imagen 81. Comparación de potencias de corte para fresado en oposición (UP milling) y en concordancia (DOWN milling), teniendo las siguientes condiciones de mecanizado: $V_c = 100$ m/min, y un aumento del avance por revolución, pasando de 0,1 (mm/rev) a 0,2 (mm/rev)

Se puede observar en esta **Imagen 81** cómo aumentando el avance por revolución, la potencia crece en gran medida en ambos procedimientos de fresado.

Ahora vamos a estudiar el comportamiento que tiene la fuerza de corte en ambos fresados, cuando se mantiene constante la velocidad de corte, y se aumenta el avance por revolución.

Se ha fijado una velocidad de corte constante $V_c = 100$ (m/min), y se ha variado el avance por revolución tomando los siguientes valores: 0,1 (mm/rev), 0,12 (mm/rev), 0,15 (mm/rev), 0,2 (mm/rev).

En la **Imagen 82** se muestra este caso:

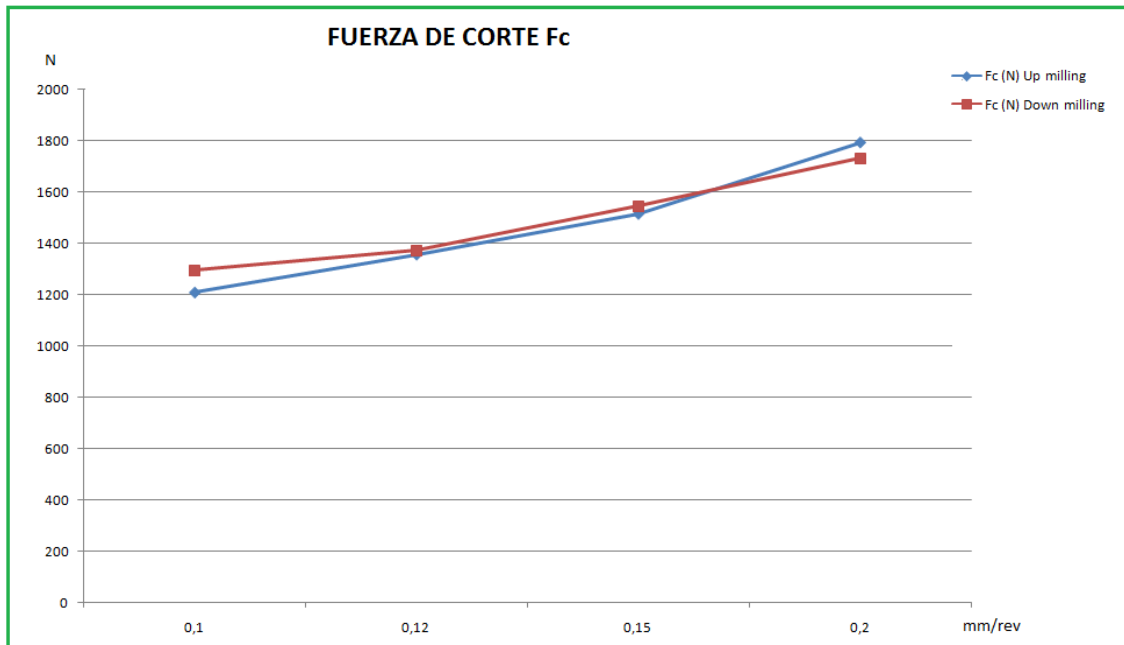


Imagen 82. Fuerzas de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $V_c = 100$ (m/min) y variando el avance por revolución de la fresa

En la **Imagen 82** queda demostrado como aumentando el avance por revolución de la herramienta, cuando se mantiene la velocidad de corte constante (en este caso en $V_c = 100$ m/min), la fuerza de corte aumenta progresivamente.

También se observa que las fuerzas de cortes para $V_c = 100$ (m/min) son de valores muy cercanos en ambos tipos de fresado.

En la siguiente **Imagen 83** vemos lo que ocurre en la fuerza resultante R del fresado, cuando se aumenta el avance por revolución y se mantiene constante la velocidad de corte ($V_c = 100$ m/min):

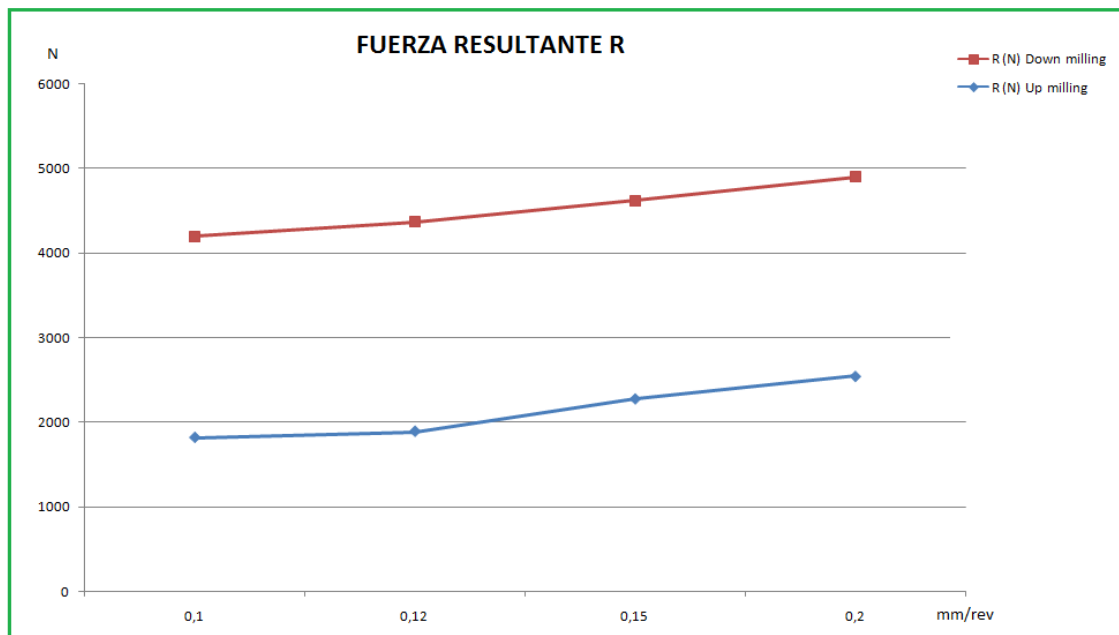


Imagen 83. Fuerza resultante para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $V_c = 100$ (m/min) y variando el avance por revolución de la fresa

En la **Imagen 83** mostrada se observa la tendencia que tienen ambos fresados de aumentar la fuerza resultante R , conforme crece el avance por revolución, al mantener la velocidad de corte constante.

También se ve que la fuerza resultante en el fresado en concordancia es mucho mayor que la fuerza resultante en fresado en oposición. Esto implica que la fuerza radial del fresado en concordancia también sea mucho mayor que la fuerza radial para el fresado en oposición, ya que como veíamos en la **Imagen 82** las fuerzas de corte no tienen tanta diferencia entre sí para $V_c = 100$ m/min.

Vamos a ver cómo es el comportamiento de la fuerza de corte y la fuerza resultante para un fresado con una velocidad constante mucho más elevada.

Elegimos una velocidad de corte $V_c = 180$ m/min, y variamos el avance por revolución. Estas condiciones para estudiar el comportamiento de la fuerza de corte se muestran en la **Imagen 84**:

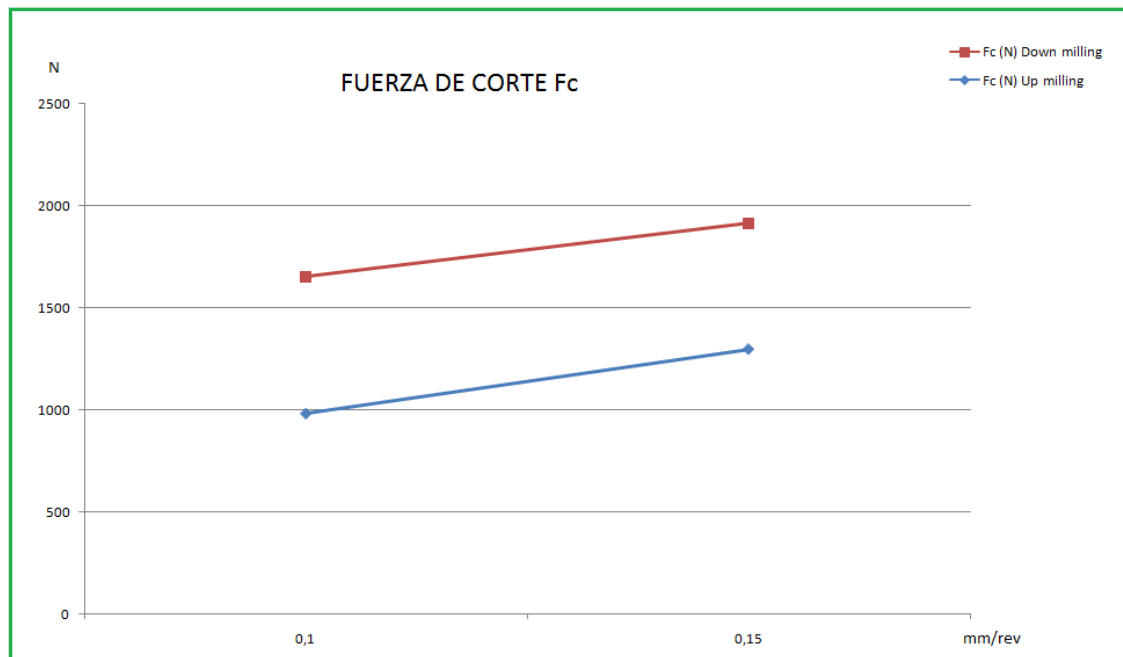


Imagen 84. Fuerzas de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $V_c = 180$ (m/min) y variando el avance por revolución de la fresa

En este caso de la **Imagen 84**, para una velocidad de corte constante $V_c = 180$ (m/min) se observa la tendencia que tiene a aumentar la fuerza de corte conforme aumenta el avance por revolución. Este comportamiento es el mismo que el que ocurría en la **Imagen 82**, pero sin embargo hay una diferencia notoria, y es que al aumentar la velocidad de corte de 100 a 180 (m/min), las fuerzas de corte son mucho mayores para fresado en oposición (Down milling).

Al haber tanta gran diferencia de valor entre las fuerzas de corte, las potencias de corte también son mucho más elevadas a altas velocidades en fresado en oposición, como se veía en la **Imagen 80**.

Ahora vamos a representar la fuerza resultante del fresado comparando los dos métodos de fresado, variando el avance por revolución y manteniendo la velocidad de corte $V_c = 180$ (m/min). Se adjunta para tal efecto la **Imagen 85**

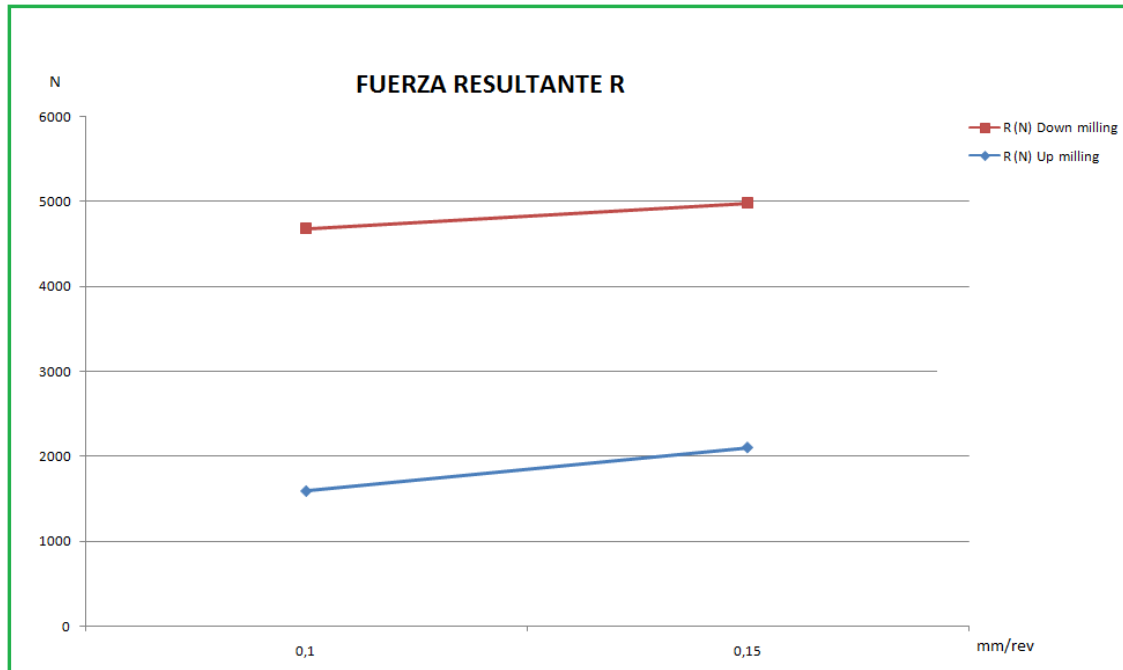


Imagen 85. Fuerza resultante para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $V_c = 180$ (m/min) y variando el avance por revolución de la fresa

Se observa como aumenta la diferencia en la fuerza resultante R para fresados en oposición y concordancia, conforme aumenta la velocidad de corte en el mecanizado, siendo mucho más elevada la fuerza resultante para el fresado en concordancia (DOWN milling).

En cuanto a la tendencia que sigue, no existe ninguna diferencia entre la representada en la **Imagen 83** y esta **Imagen 85**, ya que al incrementar el avance por revolución manteniendo la velocidad de corte constante, la fuerza resultante también crece.

Por último vamos a representar como se incrementa la potencia de corte cuando se mantiene constante la velocidad de corte y esta es elevada ($V_c = 180$ m/min), y se incrementa el avance por revolución de la fresa:

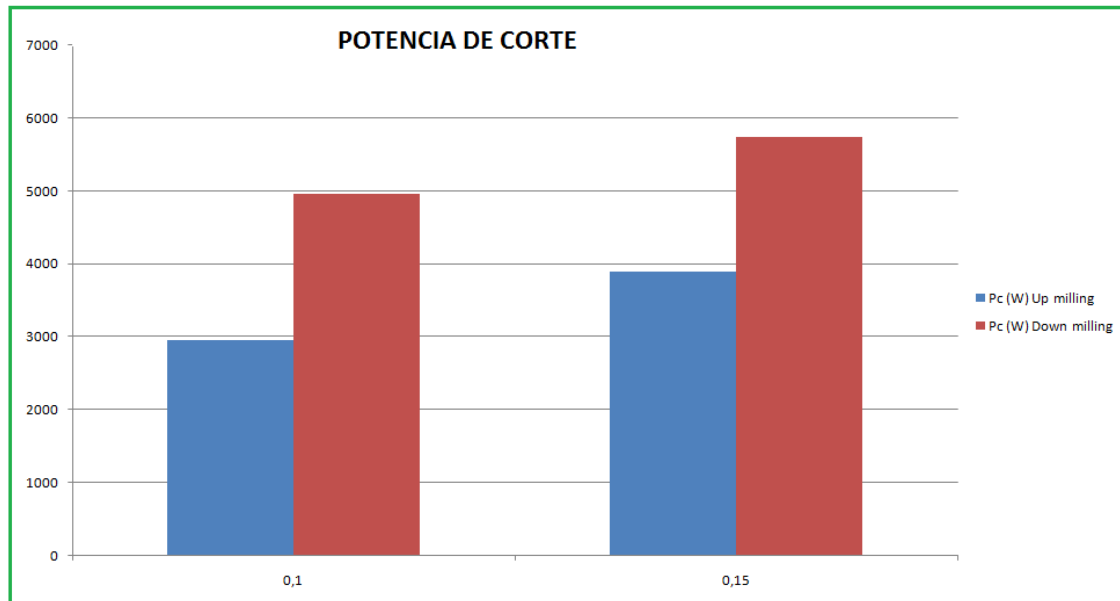


Imagen 86. Potencia de corte para fresado en concordancia y en oposición durante el mecanizado, con $V_c = 180$ (m/min) y variando el avance por revolución de la fresa

Se observa en la **Imagen 86** que cuando se trabaja con velocidades de corte muy altas, la potencia de corte requerida para realizar el fresado en concordancia es mucho más elevada que la requerida para el fresado en oposición. Esto es debido a que la fuerza de corte también es mucho más alta en fresado en concordancia a elevadas velocidades de corte.

También se refleja como se ha mencionado en anteriores ocasiones, que al aumentar el avance, manteniendo la velocidad de corte constante, la potencia de corte aumenta.

↑ f ↑ P_c



4.3. Análisis de rugosidad de las placas

Se ha realizado un pequeño estudio complementario de rugosidades para las placas fresadas.

Con este estudio y análisis de rugosidades, se pretende mostrar experimentalmente una comparación entre ambos tipos de fresado, en concordancia (DOWN milling) y en oposición (UP milling).

Antes de mostrar los resultados obtenidos correspondientes a este estudio, daremos unas nociones breves acerca de qué se entiende por un estudio de rugosidades de un material y cómo se ha de realizar.

La rugosidad se define como la distancia entre el punto más alto y el punto más bajo de una superficie donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.

La rugosidad en las aplicaciones industriales cobra una grandísima importancia, ya que por ejemplo en la industria de la automoción, la fabricación de componentes para el motor con un mejor acabado superficial, supone menores emisiones contaminantes al ambiente.

El instrumento principal empleado para un estudio de rugosidades es el palpador, el cual está conectado a un PC, y conforme recorre la pieza cuya rugosidad se quiere estudiar, se envía la información a dicho ordenador, gracias a un software instalado que cumple con este cometido.

Existen muchos y distintos tipos de parámetros que se pueden medir en un estudio de rugosidades. En función de la información que se desee obtener, se eligen unos parámetros u otros.

Para medir la rugosidad en un mecanizado, se ha de medir siempre en la dirección perpendicular al mecanizado, y así es como se ha hecho para la realización de este estudio, tal y como se muestra a continuación:

En la **Imagen 87** se muestra la metodología seguida para realizar el estudio de rugosidades en las placas de acero previamente fresadas:

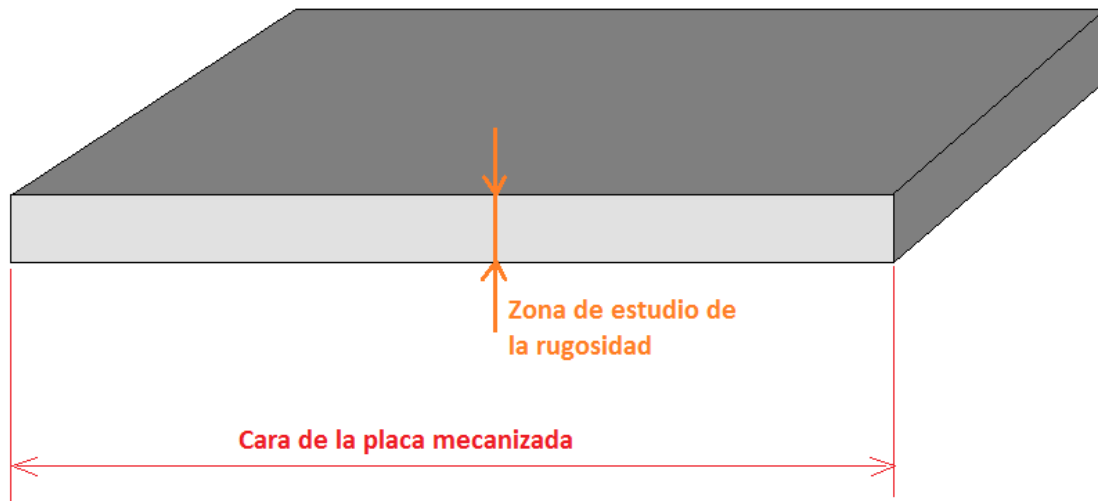


Imagen 87. Metodología seguida para el estudio de rugosidades en las placas mecanizadas

Ya habiendo definido lo que se entiende por un estudio de rugosidades y de qué modo realizarlo, se procede a mostrar los resultados obtenidos.

Con el objetivo de alcanzar los resultados más comunes y fiables posibles, para posteriormente realizar una comparativa que se aproxime lo máximo posible a las mismas condiciones, se ha realizado este estudio de rugosidades para la misma velocidad de corte V_c y por consiguiente la misma velocidad de giro de la fresa:

$$V_c = 100 \text{ (m/min) , } n = 1476 \text{ (rev/min)}$$

Y también para el mismo avance por revolución de la herramienta:

$$f_n = 0,15 \text{ (mm/rev), } f = 220 \text{ (mm/min)}$$

El rugosímetro utilizado es de la marca "Taylor Hobson", y las medidas han sido realizadas en el espesor de la placa, en la dirección perpendicular al mecanizado.

Se han realizado dos análisis de rugosidades, uno para la placa de acero fresada en concordancia (DOWN milling) y otro para la placa fresada en oposición (UP milling).

Empezamos por mostrar el comportamiento en la rugosidad de la placa mecanizada con el procedimiento: **Fresado en oposición (UP milling)**:

Obtenemos el siguiente resultado mostrado en la **Imagen 88** en cuanto a crestas y valles:

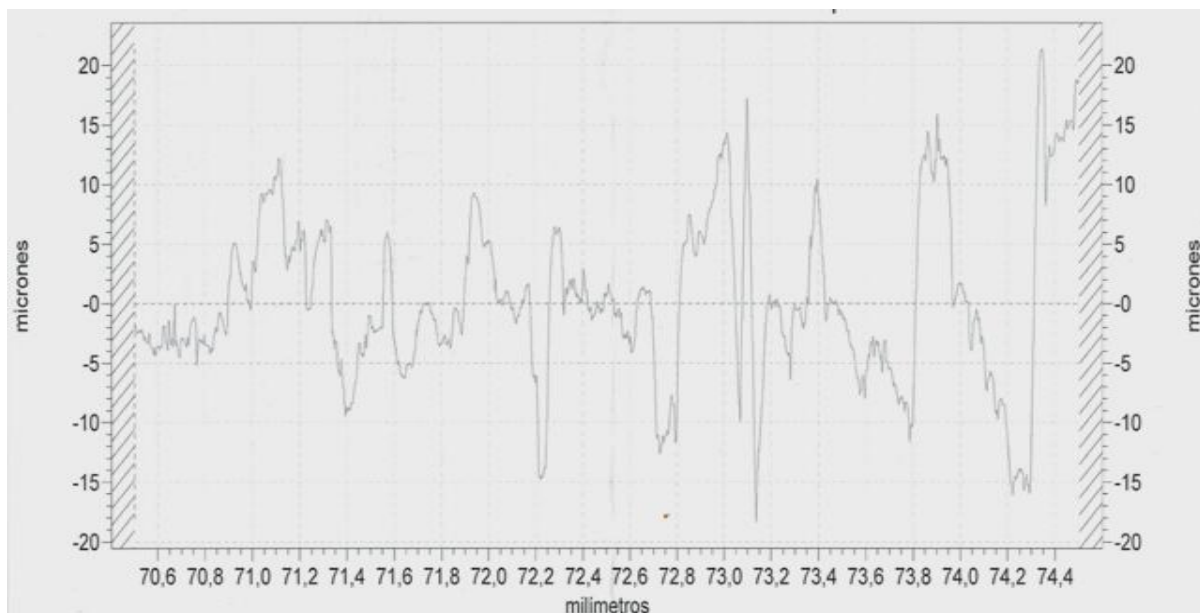


Imagen 88. Estudio rugosidades para fresado en oposición (UP milling) - con las siguientes condiciones: $V_c = 100$ (m/min), $n = 1476$ (rpm), $f_n = 0,15$ (mm/rev), $f = 220$ (mm/min)



Los valores numéricos obtenidos para este estudio de rugosidades se definen con los siguientes parámetros mostrados en la **Tabla 15**:

Ra	5,2967	μm	Rq	6,9636	μm
Rsk	0,3946		Rku	3,1986	
Rp	13,5054	μm	Rv	12,7895	μm
RLo	4,1693	mm	Rt	39,7399	μm
Rlq	138,99	μm	Rdq	18,036	$^\circ$
Rda	11,175	$^\circ$	Rz	26,2949	μm
RS	86,53	μm	RSm	426,78	μm
Rln	4,0000	mm	Rc	23,8966	μm

Tabla 15. Parámetros obtenidos para el estudio de rugosidades de fresado en oposición (UP milling) - con las siguientes condiciones: $V_c = 100$ (m/min), $n = 1476$ (rpm), $f_n = 0,15$ (mm/rev), $f = 220$ (mm/min)

Donde el parámetro que más nos interesa es Ra, que se define como la rugosidad media, y se mide en micrómetros (μm).

Mostramos a continuación el comportamiento en la rugosidad de la placa de acero mecanizada con el procedimiento: **Fresado en concordancia (DOWN milling)** con las mismas condiciones de corte que en la **Imagen 38**, es decir:

$V_c = 100$ (m/min), $n = 1476$ (rpm), $f_n = 0,15$ (mm/rev), $f = 220$ (mm/min)

Obtenemos los siguientes resultados mostrados en la **Imagen 89** en cuanto a crestas y valles:

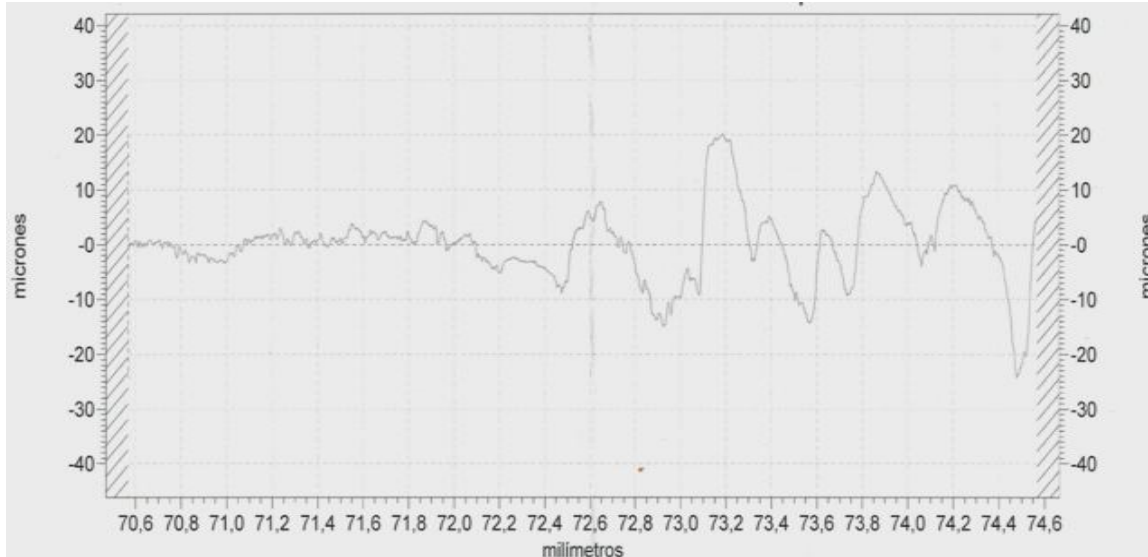


Imagen 89. Estudio rugosidades para fresado en concordancia (DOWN milling) - con las siguientes condiciones: $V_c = 100$ (m/min), $n = 1476$ (rpm), $f_n = 0,15$ (mm/rev), $f = 220$ (mm/min)

Los valores numéricos obtenidos para este estudio de rugosidades en fresado en concordancia, se definen con los siguientes parámetros mostrados en la **Tabla 16**:

Ra	4,7281 μm	Rq	6,8096 μm
Rsk	-0,0730	Rku	4,7907
Rp	9,7478 μm	Rv	12,2726 μm
RLo	4,0742 mm	Rt	44,4302 μm
Rlq	214,92 μm	Rdq	11,406 $^\circ$
Rda	7,809 $^\circ$	Rz	22,0204 μm
RS	102,62 μm	RSm	496,68 μm
Rln	4,0000 mm	Rc	20,4497 μm

Tabla 16. Parámetros obtenidos para el estudio de rugosidades de fresado en concordancia (DOWN milling) - con las siguientes condiciones: $V_c = 100$ (m/min), $n = 1476$ (rpm), $f_n = 0,15$ (mm/rev), $f = 220$ (mm/min)



Donde de nuevo el parámetro que más nos interesa es R_a , que se define como la rugosidad media, y se mide en micrómetros (μm).

Así pues, comparando los resultados obtenidos para ambos tipos de fresado en las mismas condiciones de mecanizado, podemos establecer que el fresado en concordancia presenta una menor rugosidad media ($R_a = 4,7281 \mu\text{m}$) que el fresado en oposición ($R_a = 5,2967 \mu\text{m}$).

A la vista de los resultados se puede observar cómo el fresado en oposición tiene una rugosidad con muchas crestas y valles (**Imagen 88**), debidos todos ellos a las huellas que aparecen en el mecanizado con este tipo de fresado. Estas huellas son debidas al desalojo de viruta, la cual cae en frente de la fresa y de este modo hace que la fresa al pasar por esas zonas donde existe viruta, la arrastre por el material que se está mecanizando y empeore el acabado superficial.

Sin embargo para el fresado en concordancia, tal y como se puede observar en la **Imagen 89**, no existen tantas crestas y valles como en fresado en oposición, pero las que hay son de una magnitud mayor que las de fresado en oposición. Esto es debido, a que estas crestas y valles aparecen como bandas orientadas en la dirección del mecanizado producidas por la aparición de fuertes impactos de la plaquita sobre el material, debidos dichos impactos a que el espesor de viruta es máximo al entrar en contacto con la pieza que está mecanizando, y por ello la fuerza en el momento de contacto herramienta-material es máxima.



4.4. Estudio micrográfico de las placas mecanizadas

El propósito de este apartado en este estudio, es el de mostrar con una serie de micrografías la morfología que ha dejado el fresado con la variación en las condiciones de corte para placas de acero AISI 316L ASS, para posteriormente interpretar los resultados obtenidos.

Las imágenes incluidas en este apartado, se han tomado mediante una lupa de aumento con una cámara incluida en la lente para realizar micrografías con un aumento de 3,5X.

Se incluyen imágenes para cada tipo de fresado (en oposición o en concordancia) y de este modo poder ver qué diferencias existen entre los dos mecanizados atendiendo al daño que sufre el material al ser mecanizado.

Comenzamos mostrando una micrografía para el mecanizado con **fresado en oposición (UP milling)**. Esta **Imagen 90** representa una zona del material, donde se mecanizó con una velocidad de corte baja ($V_c=60$ m/min) y un avance por revolución también pequeño ($f_n = 0,1$ mm/rev).

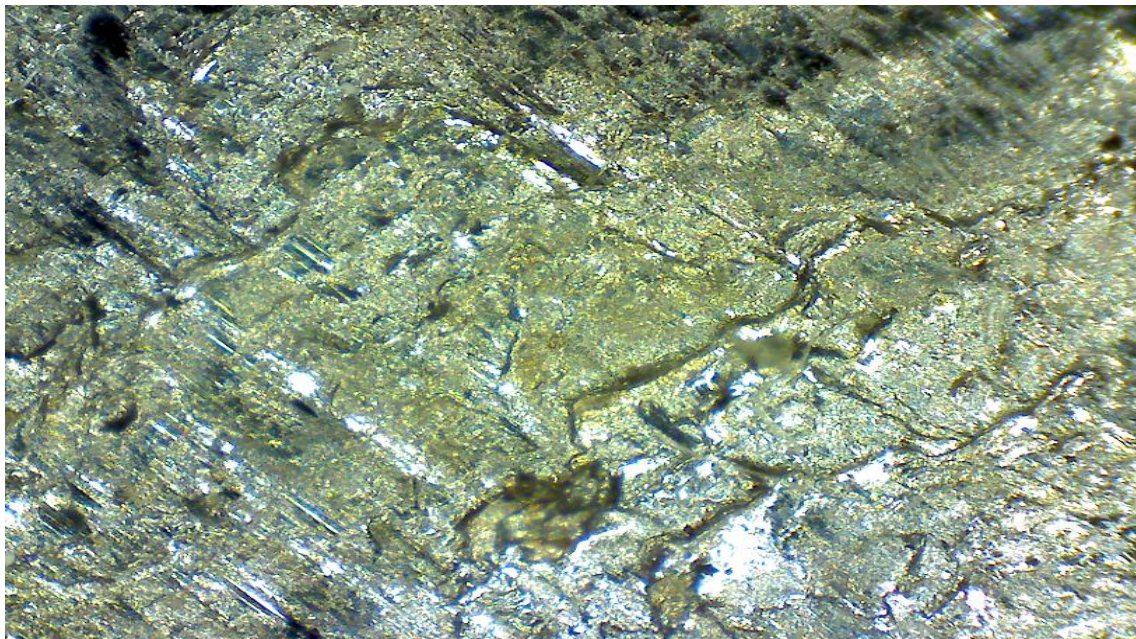


Imagen 90. Micrografía para fresado en oposición con $V_c= 60$ (m/min), $f_n=0,1$ (mm/rev)

Se puede apreciar en la **Imagen 90** como para este tipo de fresado en oposición, existen huellas en el material después del mecanizado.

Ahora vamos a mostrar en la **Imagen 91** para las mismas condiciones de fresado ($V_c = 60$ m/min, $f_n = 0,1$ mm/rev) como queda la superficie en el mismo material al ser fresado en concordancia (DOWN milling):

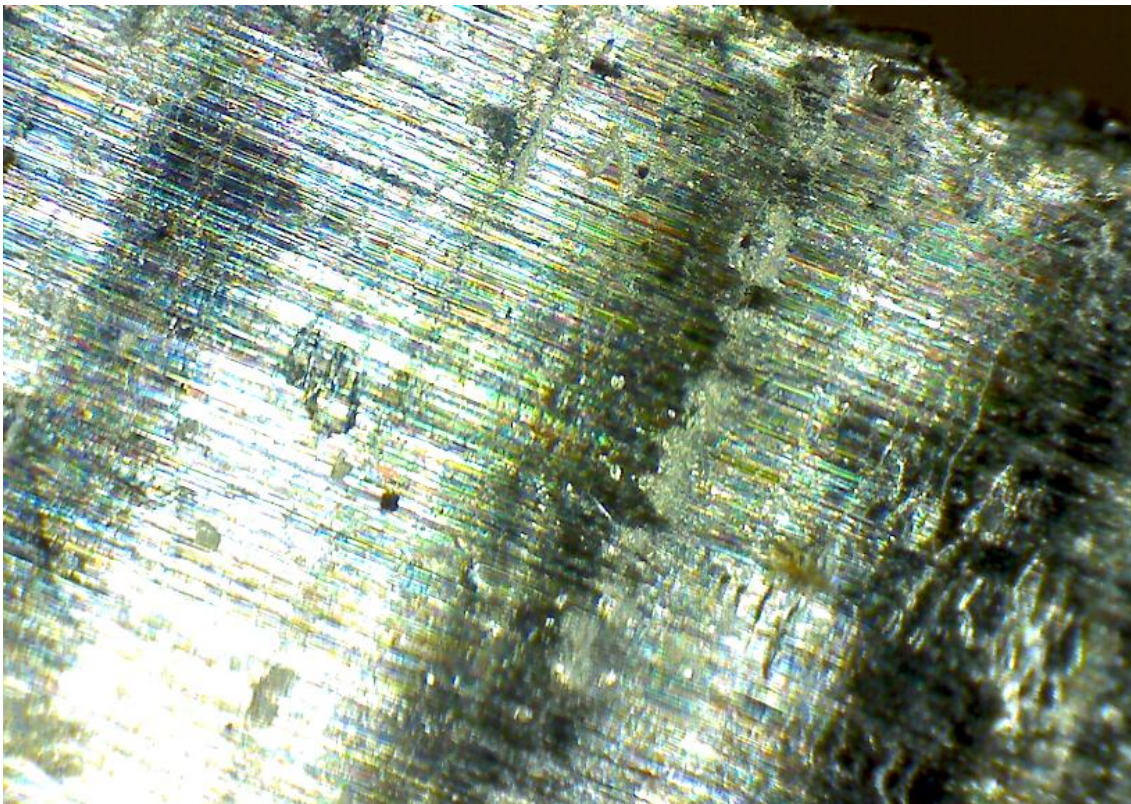


Imagen 91. Micrografía para fresado en concordancia con $V_c = 60$ (m/min), $f_n = 0,1$ (mm/rev)

Con esta **Imagen 91** lo que podemos observar es que para el fresado en concordancia, no se forman tantas huellas como lo hacen en el fresado en oposición (**Imagen 90**), pudiéndose observar con claridad la dirección longitudinal del mecanizado.

Ahora vamos a mostrar otras dos imágenes para ambos tipos de fresado, donde el material ha soportado una velocidad de corte en el mecanizado superior que para las imágenes anteriores y el mismo avance, es decir: $V_c = 100$ (m/min), $f_n = 0,1$ (mm/rev).

Empezamos adjuntando en la siguiente **Imagen 92** lo que ocurre para fresado en oposición (UP milling):



Imagen 92. Micrografía para fresado en oposición con $V_c=100$ (m/min), $f_n=0,1$ (mm/rev)

Se observa en esta **Imagen 92** la presencia de restos de filo de aportación BUE, que se han adherido al material. Este hecho se debe a la elevada presión que existe entre herramienta y material en este tipo de fresado en oposición.

Se observa también las huellas en el mecanizado de las que hablábamos antes, las cuales son debidas a que la viruta del mecanizado cae en frente de la fresa, y estas virutas son arrastradas por el material haciendo que se empeore el acabado superficial.

En la siguiente **Imagen 8** se observa como la viruta arrancada queda en frente de la fresa, es decir, en la parte del material por donde aún va a pasar la herramienta para mecanizar:

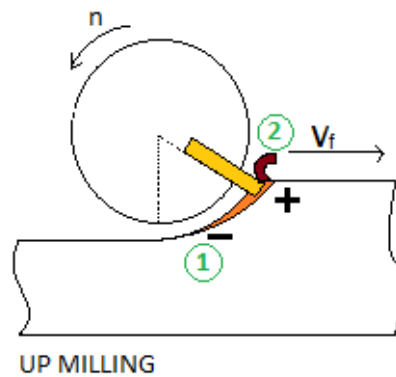


Imagen 8. Fresado en oposición (UP milling)

Las consecuencias de este desalojo de viruta provoca por un lado un peor acabado superficial con restos de huellas, al ser la viruta arrastrada por la fresa a lo largo del material de trabajo, y por otro, que además se formen restos de filo de aportación BUE, como consecuencia de la elevada presión que existe entre herramienta y material durante el mecanizado.

Ahora vamos a mostrar como es el estado superficial del material al ser fresado en concordancia (DOWN milling), en las mismas condiciones de mecanizado para las cuales se mostraba el material fresado en oposición en la **Imagen 92** ($V_c= 100$ (m/min), $f_n= 0,1$ (mm/rev)).

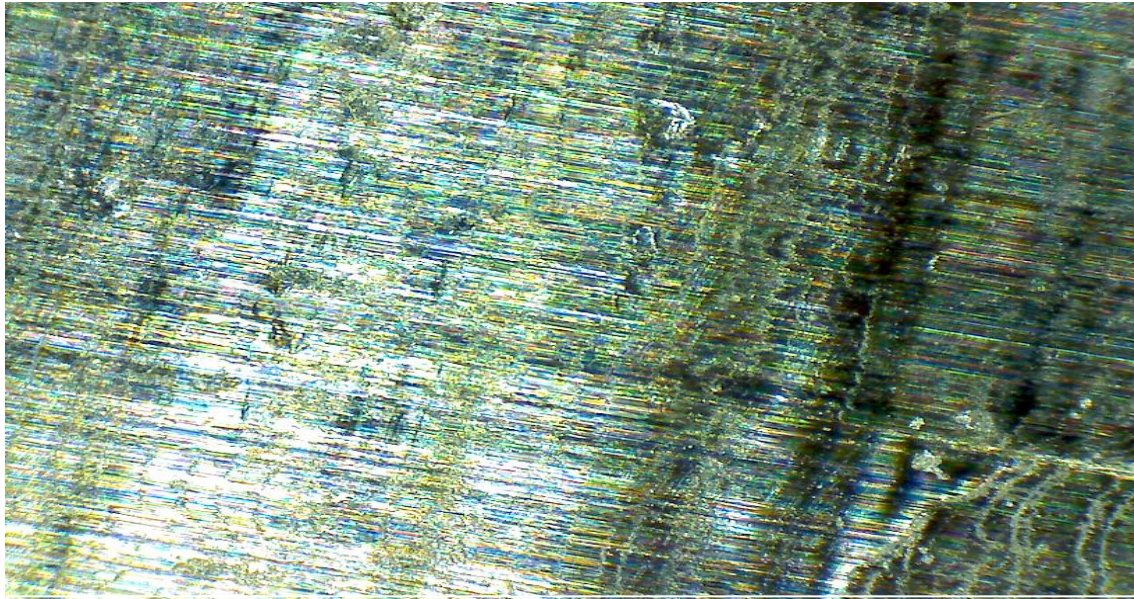


Imagen 93. Micrografía para fresado en concordancia con $V_c=100$ (m/min), $f_n=0,1$ (mm/rev)

Se observan los mismos resultados prácticamente que se exponían con anterioridad para este tipo de fresado, es decir, no se forman tantas huellas como en el fresado en oposición, y se observa fácilmente la dirección del mecanizado.

Vamos a mostrar el estado del material al fresar en concordancia, con la misma velocidad de corte $V_c=100$ (m/min) que en la **Imagen 93**, pero aumentando el avance por revolución pasando de $f_n=0,1$ (mm/rev) a $f_n=0,2$ (mm/rev). Se muestra en la **Imagen 94**:

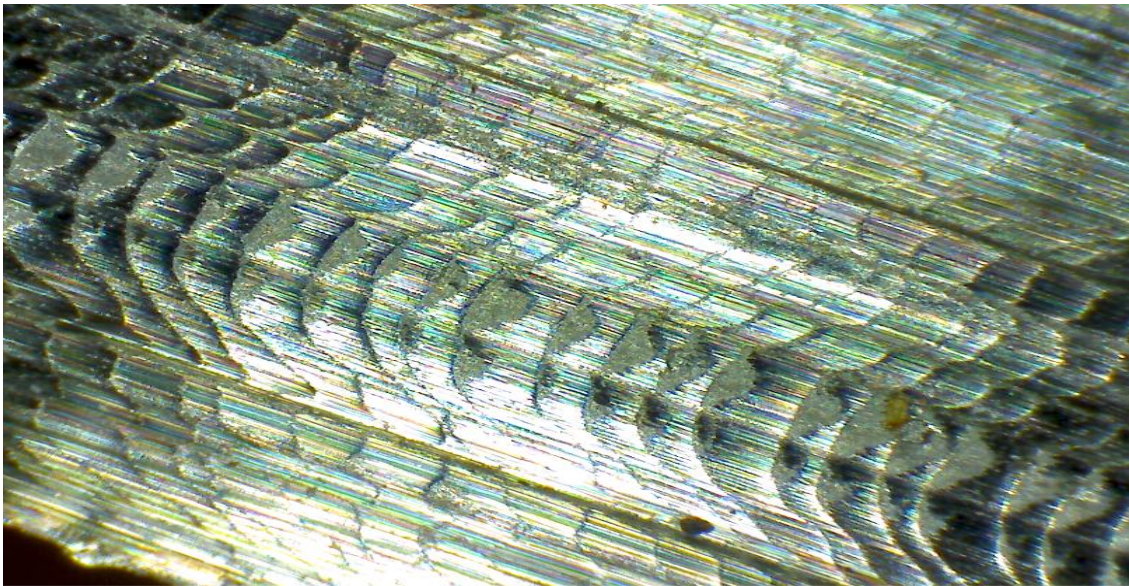


Imagen 94. Micrografía para fresado en concordancia con $V_c=100$ (m/min), $f_n=0,2$ (mm/rev)

Vemos en la **Imagen 94** que aparecen bandas orientadas en la dirección de mecanizado, esto se debe a la presencia de un impacto con el que entra la herramienta al mecanizar el material, ya que recordemos que para fresado en concordancia se mecaniza de mayor a menor espesor, y por tanto las mayores fuerzas aparecen en el momento de contacto de la herramienta con el material, donde el espesor de viruta es máximo, como se observa en la **Imagen 9**:

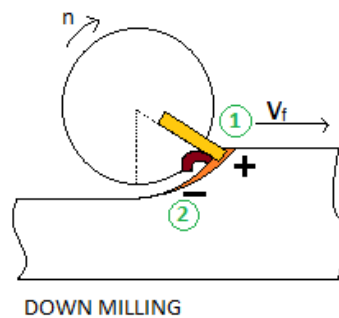


Imagen 9. Fresado en concordancia (DOWN milling)

Por último para finalizar este estudio micrográfico, vamos a mostrar cómo es la superficie del material cuando se trabaja a elevadas velocidades de corte para ambos tipos de fresado.

Comenzamos mostrando una foto tomada de la placa de acero fresada en concordancia a elevada velocidad de corte $V_c= 180$ (m/min).

En esta **Imagen 95** se puede apreciar como una elevada velocidad de corte de fresado, hace que se incrementen en gran medida la fuerza de corte y la fuerza resultante, y la poca capacidad que tiene este acero AISI 316L para evacuar el calor producido consecuencia de las elevadas temperaturas causadas por esas elevadas fuerzas de corte, hace que el material se queme:

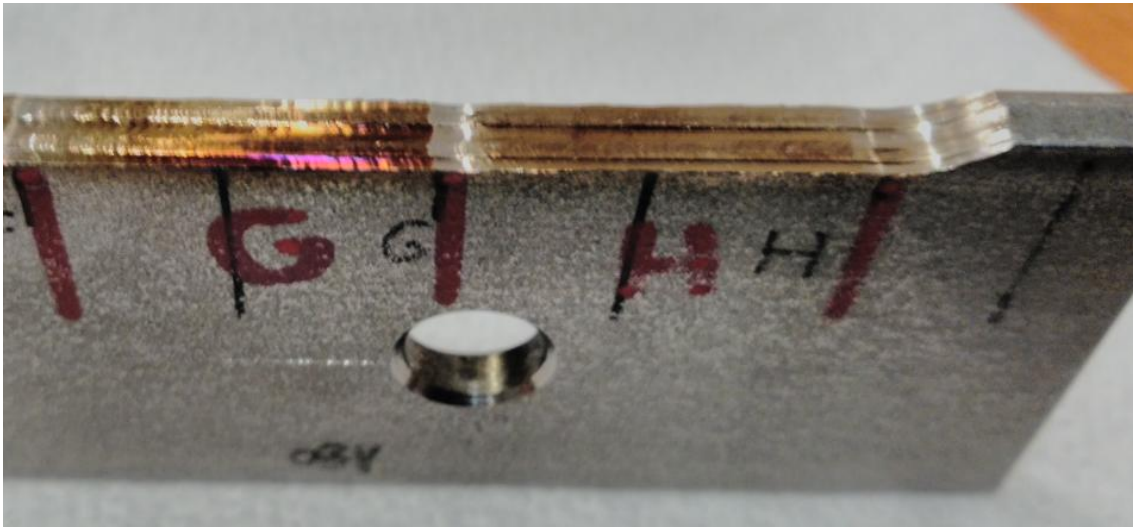


Imagen 95. Foto tomada de la placa de acero habiendo sido fresada en concordancia con $V_c=180$ (m/min)



Ahora vamos a mostrar con la **Imagen 96** una micrografía donde se observa cómo ha quedado el estado del material al haber sido sometido a un fresado en concordancia a tan elevadas temperaturas:

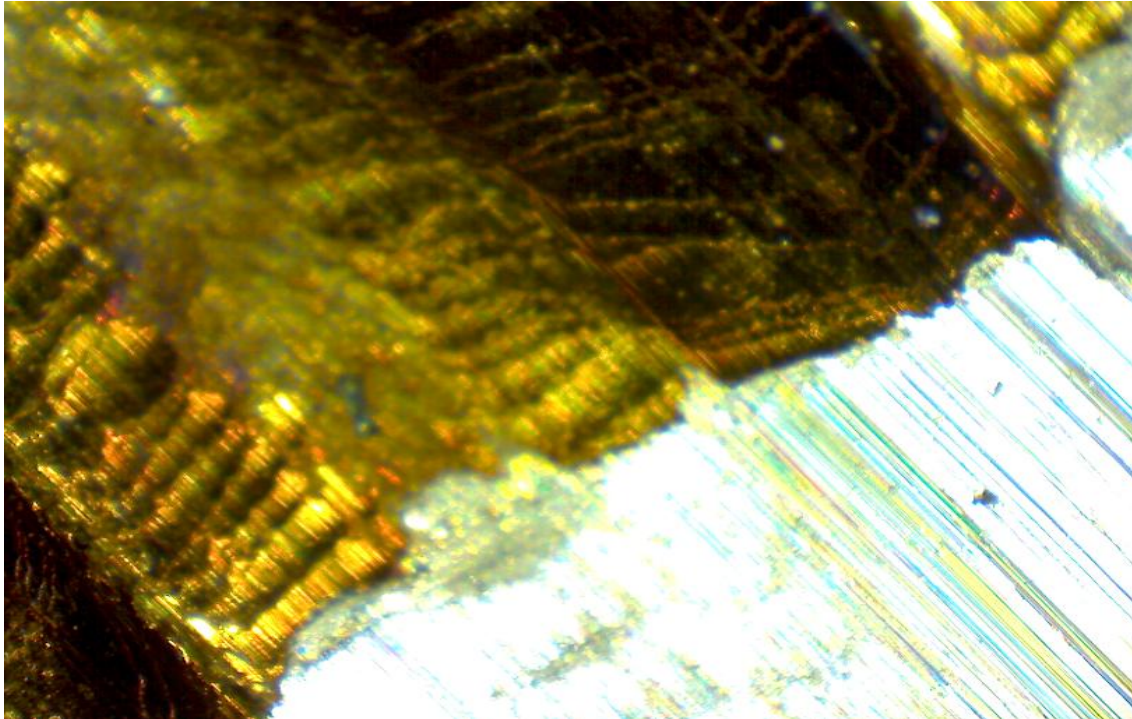


Imagen 96. Micrografía para fresado en concordancia con $V_c=180$ (m/min), $f_n=0,1$ (mm/rev)

Ahora vamos a ver qué le ocurre al material cuando se fresa a elevada velocidad de corte con el procedimiento de fresado en oposición (UP milling).

Las condiciones del mecanizado para las cuales se muestra la siguiente **Imagen 97** son: $V_c = 180$ (m/min), $f_n = 0,15$ (mm/rev):



Imagen 97. Micrografía para fresado en oposición con $V_c = 180$ (m/min), $f_n = 0,15$ (mm/rev)

Se observa en esta **Imagen 97** la presencia de claras huellas en el mecanizado debido a la presencia de viruta que es arrastrada a lo largo del material según avanza la herramienta y provoca este mal acabado superficial. También se puede observar restos de filo de aportación BUE, que se ha quedado adherido a la superficie del material fresado, debido a que la viruta que es desalojada cae en frente de la fresa, y la alta presión que existe en el contacto entre herramienta y material hace que se pegue al material que es mecanizado.



CAPÍTULO V

Conclusiones y líneas futuras





5. Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

La realización de este estudio experimental de fuerzas de corte en el fresado de un acero AISI 316L ASS nos ha reportado destacados resultados que a continuación vamos a exponer y razonar a qué motivos son debidos.

El objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado es ampliar el conocimiento que existe sobre el mecanizado de corte ortogonal, y más particularmente, en el fresado de aceros inoxidables austeníticos, donde el espesor de viruta cortado juega un papel fundamental.

Se han empleado dos procedimientos de fresado para este estudio, fresado en concordancia (Down-milling) y fresado en oposición (Up-milling) donde la principal diferencia entre ambos métodos, es el espesor de viruta que se arranca del material y de qué modo se hace.

En el fresado en concordancia (Down-milling) la viruta arrancada del material va de mayor a menor espesor, por el contrario, en el fresado en oposición (Up-milling) el grosor de viruta va de menor a mayor espesor.

Este parámetro, el espesor de viruta, condiciona las fuerzas que se obtienen en el proceso de mecanizado. Tanto es así, que en el fresado en concordancia, los valores de la fuerza de corte y fuerza resultante más altos, se alcanzan en el momento en el cual la herramienta entra a mecanizar el material, donde el espesor de viruta es mayor. Sin embargo para el fresado en oposición, la fuerza de corte máxima se alcanza en el instante en el cual la herramienta sale del material, instante en el que el espesor de viruta arrancado es máximo. Para la fuerza resultante en fresado en oposición, existen dos puntos máximos, como son el momento en el cual la herramienta entra en el material, y el instante en el que el espesor de viruta arrancado es máximo. Aunque por lo general, el momento para

el cual la fuerza resultante es máxima en fresado en oposición, es cuando se alcanza el espesor de viruta máximo.

Observando la **Imagen 98**, se puede establecer que las fuerzas máximas en el mecanizado para fresado en concordancia (Down- milling) se dan en el punto **1**. En su contra, en fresado en oposición (Up- milling) las fuerzas más elevadas se tienen en el punto **2** mostrado en la **Imagen 98**.

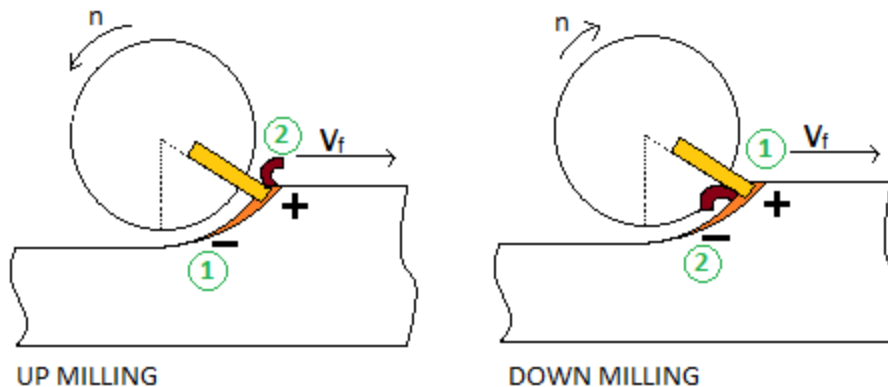


Imagen 98. Procedimiento: Fresado en oposición (Up-milling) vs. Fresado en concordancia (Down-milling)

Con respecto a la potencia de corte necesaria en la máquina para realizar el mecanizado, debido a su dependencia con la fuerza de corte, podemos concluir que en fresado en concordancia (Down-milling) la potencia de corte es máxima en el punto **1**, instante en el que el espesor de viruta también es máximo. Con el mismo razonamiento se establece que la potencia de corte máxima en fresado en oposición (Up-milling) se alcanza en el punto **2**, instante en el cual la herramienta acaba la pasada en el material y el espesor de viruta con lo cual es máximo.

Atendiendo a la fuerza resultante en el fresado, combinación de la fuerza de corte y de la fuerza radial, se ha podido verificar que la fuerza resultante es siempre de valor mayor en fresado en concordancia que en fresado en oposición. No ocurre lo mismo con la fuerza de corte, ya que dependiendo del punto donde se encuentre el mecanizado, la fuerza de corte será mayor para fresado en concordancia o para fresado en oposición.



Fijándonos en los resultados obtenidos en los ensayos, se han podido obtener relaciones entre los parámetros del mecanizado y las fuerzas del mecanizado.

Se ha observado que manteniendo la velocidad de corte constante y aumentando el avance por revolución (mm/rev) de la herramienta, la fuerza de corte y la fuerza resultante aumenta en ambos tipos de fresado (oposición y concordancia). Debido a la relación que existe entre la fuerza de corte y la potencia de corte, se puede asegurar a su vez que, aumentar el avance por revolución supone aumentar la potencia necesaria en el mecanizado.

También se puede concluir con seguridad a la vista de los resultados obtenidos, que aumentar la velocidad de corte, manteniendo el avance por revolución constante, da resultados distintos según se mecanice en concordancia o en oposición.

En concordancia aumentar la velocidad de corte supone aumentar la fuerza de corte y la fuerza resultante en el fresado, y por ello a su vez, aumenta la potencia de corte. Sin embargo aumentar la velocidad de corte trabajando en fresado en oposición supone disminuir la fuerza de corte y la fuerza resultante, aunque sin embargo la potencia de corte sí que aumenta debido al incremento de la velocidad de corte que compensa la caída de la fuerza de corte.

También se ha podido observar que conforme aumenta la velocidad de corte, existe mayor diferencia entre el valor de las fuerzas de corte en oposición y en concordancia, siendo más grande la fuerza de corte en fresado en concordancia que la fuerza de corte en fresado en oposición. Trasladando estos resultados a la potencia de corte, podemos afirmar que conforme aumenta la velocidad de corte del mecanizado, la potencia de corte necesaria para realizar un fresado en concordancia es cada vez mayor que la potencia de corte necesaria para realizar un fresado en oposición.

Las conclusiones que se acaban de dar con respecto a las fuerzas, potencia de corte y parámetros del mecanizado, se han obtenido a través de un dinamómetro instalado en la herramienta y un posterior sistema de adquisición y tratamiento de datos efectuado con el software DasyLab 8.0. Además se ha realizado un estudio de rugosidades y a través de micrografías, se ha logrado otra serie de resultados que han sido relacionados con las fuerzas de corte en el mecanizado.



Estudiando la rugosidad en el post-fresado de las placas de acero AISI 316L ASS, se ha observado la aparición de huellas debidas al mecanizado para el fresado en oposición (Up-milling). Estas huellas son debidas a la viruta que sale del fresado, la cual cae en frente de la fresa y hace que la propia herramienta cuando pasa por esas zonas, arrastre la viruta a lo largo del material que mecaniza y provoca así que se empeore el acabado superficial.

También se ha observado la aparición de filo de aportación BUE para el material que ha sido fresado en oposición. La presencia de este filo de aportación se debe a dos factores: por un lado al desalojo de la viruta que hace que se deposite material en frente de la fresa y ésta arrastre dicha viruta durante el proceso de mecanizado, y por otro lado, se debe a la elevada presión que existe para este tipo de fresado entre el material y la herramienta, la cual hace que la viruta se quede adherida al material que está siendo mecanizado. En la siguiente **Imagen 99** se muestra la presencia de filo de aportación en el acero fresado en oposición (Up-milling).

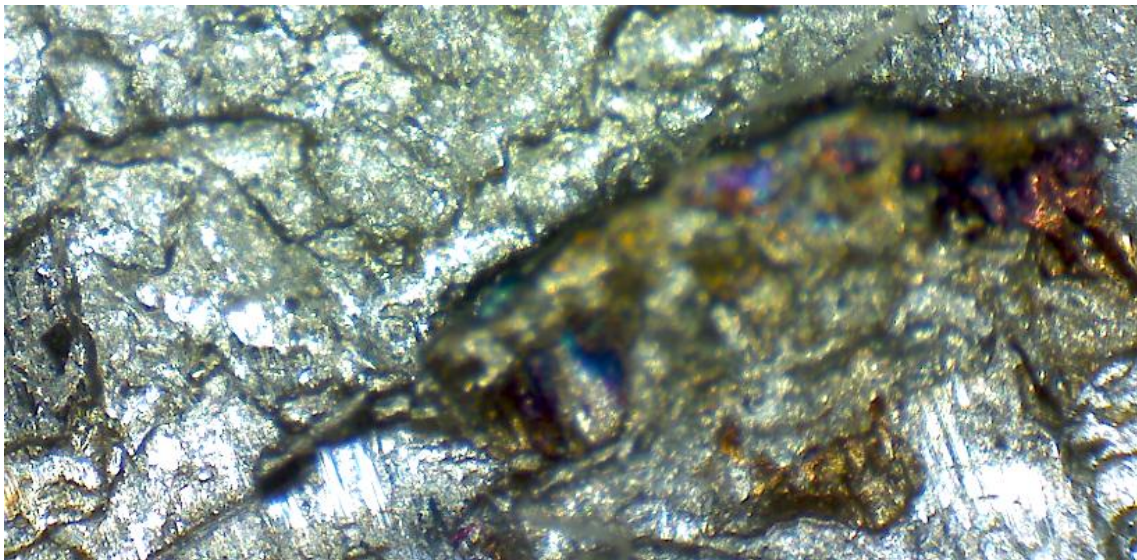


Imagen 99. Presencia de filo de aportación en el acero fresado en oposición (Up milling)

Para el material fresado en concordancia (Down milling) se ha observado la aparición de bandas orientadas en la dirección del mecanizado. Estas bandas mostradas en la **Imagen 100** son debidas al impacto que soporta el acero AISI 316L ASS cuando la herramienta entra en contacto con el material. Este fuerte impacto es consecuencia del elevado valor que presenta la fuerza de corte en fresado en concordancia (Down milling), ya que para este fresado se comienza mecanizando de mayor a menor espesor, y la fuerza por tanto en el momento de contacto de la herramienta con el material es máxima.

Estas bandas orientadas en la dirección del mecanizado, son más evidentes conforme se aumenta la velocidad de corte y el avance por revolución de la herramienta.

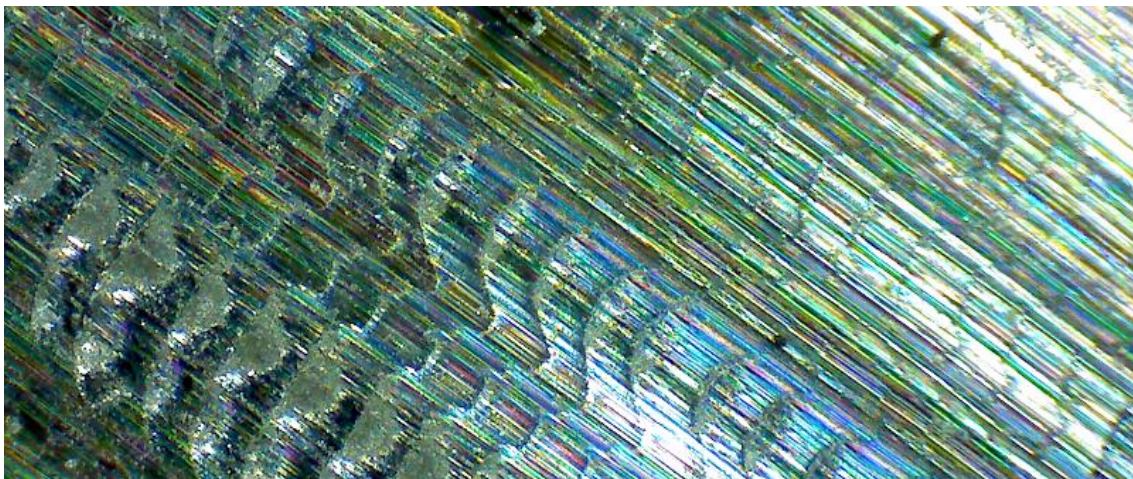


Imagen 100. Presencia de bandas orientadas en la dirección del mecanizado en el acero fresado en concordancia (Down milling)

Por último, un resultado destacable que se dió durante el fresado en concordancia (Down-milling) cuando se mecanizaba a elevada velocidad, fue, un incremento muy elevado en el valor de la temperatura del mecanizado, que hizo que se quemase el acero durante el fresado y dejó restos aparentes de ello en la placa de acero fresada. Este hecho acontecido fue debido a la elevada velocidad de corte con la que se trabajaba, que hizo que se aumentase enormemente la fuerza de corte y la fuerza resultante, provocando un gradiente térmico muy elevado durante el mecanizado. Además el material empleado en el ensayo, el acero AISI 316L ASS es un material aislante que le cuesta mucho desalojar el calor, y la viruta no pudo desalojar todo este calor provocado por la elevada fuerza de corte, haciendo que el material así pues se quemase.



5.2. Líneas futuras

En este apartado se va a dar posibles sugerencias a realizar en futuros ensayos, con el objetivo de obtener más resultados en diferentes condiciones y poder establecer relaciones entre las condiciones con las que se ha realizado este estudio y estas otras alternativas. También se plantearán factores que se podrían profundizar sin salirnos del estudio realizado.

Empezaremos hablando sobre las condiciones sobre las que se han realizado estos ensayos. Se ha trabajado con unas condiciones de mecanizado en seco, con lo cual no se ha podido minimizar los defectos que ha provocado la viruta en estos casos con estos dos métodos de fresado. Una alternativa que se podría plantear es la de trabajar con taladrina o fluido refrigerante, de este modo además de tener un mayor control sobre la viruta, se puede disminuir la temperatura de corte, factor este último que, entre otras consecuencias, hace que se reduzca la vida de la plaquita que mecaniza.

Tratando sobre esto último, se ha de destacar entre otros factores, la importancia que tiene el desgaste de la herramienta en un proceso de mecanizado. Los dos factores más importantes en un proceso de mecanizado industrial son, la calidad en el proceso ante todo, pero sin dejar nunca a un lado el factor económico. De este modo se subraya el papel tan importante que juega el desgaste o la vida útil de una herramienta, que influye con vital importancia en ambos dos factores. Así pues, una alternativa a desarrollar en líneas futuras sería trabajar con dos plaquitas, una para fresado en concordancia y otra para fresado en oposición, y después del mecanizado con ambos dos métodos, estudiar cuál de las dos ha sufrido un mayor desgaste, dado que evaluar el desgaste del filo que mecaniza, supone también evaluar la calidad del mecanizado.

Otra alternativa a esto último, podría ser estudiar la vida que tiene la herramienta con uno y otro método cuando se utiliza taladrina en el proceso de mecanizado.

Sin salirnos del ámbito de la plaquita que mecaniza, se podría utilizar otro tipo de plaquita, con recubrimiento por ejemplo, ya que en los ensayos realizados no se ha usado este complemento en el filo de corte, y así de este modo observar además de la vida útil de la misma, cómo influye en el acabado superficial de la pieza mecanizada, es decir, estudiar la calidad de la misma.

Y por último, otra alternativa podría ser la de realizar estos mismos ensayos, pero utilizando otros materiales diferentes al acero AISI 316L ASS que se emplea en este. De este modo, se podría ampliar el conocimiento que se tiene sobre el fresado ortogonal y podríamos comparar los resultados obtenidos y estudiar qué similitudes y diferencias guardan ambos estudios, y a qué factores son debidos.



CAPÍTULO VI

Bibliografía





6. Bibliografía

Se va a dividir este apartado en dos tipos de fuentes bibliográficas consultadas. Por un lado "DOCUMENTOS, LIBROS Y REVISTAS" y en segundo lugar "ENLACES DE INTERNET".

DOCUMENTOS, LIBROS Y REVISTAS

- [1] C.Maranhao& J.Paulo Davim - "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: Numerical simulation and experimental validation", Simulation Modelling Practice and Theory 18 , Aveiro (Portugal), 2010, pp. 139-156
- [2] C.R. Liu, M.M. Barash - "The mechanical state of the sub-layer of a surface generated by chip removal process", Part I: Cutting with a sharp tool, Trans. ASME 98(4), 1976, pp.257-264
- [3] Carlos Oliva García - "Estudio de las fuerzas de corte en el taladrado de materiales compuestos tipo carbono/epoxi aplicados en la industria aeronáutica", Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Valladolid, 2010
- [4] D. Umbrello, R. M'Saoubi, J. Outeiro - "The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel", International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, (2007), pp. 462-470
- [5] DasyLab - "User Guide Version 8.0", 2000



- [6] E. Capello - "Residual stresses in turning Part I: Influence of process parameters", *Journal of Materials Processing Technology* 160 (2005), pp. 221-228

- [7] E.M. Trent - "Metal cutting", Butterwoth/Heinemann, London, 1991

- [8] G. H. Farrahi, V. Kazerani, M.S. Ghorashi - "Test methodology and wear characteristics of austenitic steel AISI Type 316 at Cryogenic Environment", *Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II, WCE (2014)*, July 2 -4, London U.K

- [9] K. Henriksen - "Residual stresses in machined surfaces", *Trans. ASME* 73 (January 1951), pp. 265-278

- [10] K.Okushima, Y.Kakino - "A study on the residual stress produced by metal cutting", *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kuyoto* 34 (1972), pp. 234-248

- [11] Kistler - "Manual dinamómetro rotatorio", 1995

- [12] Manuel San-Juan, Óscar Martín, M. del P. de Tiedra, F.J. Santos, R. López, J.A Cebrián - "Study of cutting forces and temperatures in milling of AISI 316L", *Proceedings of the 6th Manufacturing Engineering Society International Conference – Barcelona – July 2015*

- [13] N.L. Parthasarathi , Utpal Borah, Shaju K. Albert - "Effect of temperature on sliding wear of AISI 316 L(N) stainless steel – Analysis of measured wear and surface roughness of wear tracks", *Materials and Design*, (2013), pp. 676-682



- [14] P. Dahlman, F. Gunnberg, M.Jacobson - "The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning", Journal of Materials Processing Technology 147, (2004), pp. 181-184
- [15] Peter Michalik, JozefZajac, Michal Hatala, DusanMital, VeronikaFecova - "Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling", Measurement, 2014, pp. 416-428
- [16] R. M'Saoubi, J.Outeiro, B.Changeux, J.Lebrun, A. Dias - "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316 L steels", Journal of Materials Processing Technology 96, 1999, pp. 225-233
- [17] Sandvik Coromant- "Guía técnica de mecanizado", 2010
- [18] T. Ozel - "Computational modelling of 3D turning: influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PcBN tooling", Journal of Materials Processing Technology 109, (2009), pp. 5167-5177



ENLACES DE INTERNET

[E1]

http://2.bp.blogspot.com/-HEwKxtDFD-A/UMtwzDX2aKI/AAAAAAAAANs/xV8VNpqBM_o/s1600/diagrama+hierro+carbono%2528ingles1%2529.png

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E2]

<http://www.roytech.co.uk/images/mill7.gif>

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E3]

http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/formulas_and_definitions/the_milling_process/pages/default.aspx

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E4]

<http://es.slideshare.net/FernandooCuestas/velocidades-decorte3>

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E5]

<http://www.monografias.com/trabajos104/factores-corte-fresado/factores-corte-fresado2.shtml>

(Fecha última consulta: 27/08/2015)



[E6]

http://images.slideplayer.es/3/1110663/slides/slide_11.jpg

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E7]

https://www.u-cursos.cl/usuario/60a9bfeb0c721f171093788d3f007555/mi_blog/r/Capitulo_2_0.pdf

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E8]

<https://www.sites.google.com/site/enriquecontrerasdiaz/Diapositiva15.JPG>

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[E9]

<http://www.iscar.com/index.aspx/countryid/1>

(Fecha última consulta: 27/08/2015)

[10]

<http://www.sandvik.coromant.com/es->

(Fecha última consulta: 27/08/2015)





CAPÍTULO VII

Anexos





7. Anexos

Viruta obtenida cuando se mecaniza a una velocidad media en fresado en concordancia:



Viruta obtenida cuando se mecaniza a una velocidad elevada en fresado en concordancia:



