

Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio de proceso de fresado combinado asistido
por vibraciones

Autor: Jaime López Iglesias

Tutor: Aida Estévez Urra

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio de proceso de fresado combinado asistido por vibraciones

Autor:

Jaime López Iglesias

Tutor:

Aida Estévez Urra

Profesora Colaboradora

Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo de Fin de Grado: Estudio de proceso de fresado combinado asistido por vibraciones

Autor: Jaime López Iglesias

Tutor: Aida Estévez Urrea

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar a mi tutora, Aida Estévez Urrea, por ofrecerme este tema para el trabajo y por su continua implicación y ayuda durante el mismo. A los maestros de taller, Antonio Guillén y Manuel Sánchez, y a Marcos Borrego por su tiempo y dedicación para ayudarme los días transcurridos en el Taller de mecanizado. También al Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación por su ayuda y préstamo de equipos para la realización del trabajo. Y por supuesto a mi familia, amigos y personas que me han acompañado y apoyado para llegar hasta aquí. Muchas gracias.

Jaime López Iglesias

Sevilla, 2016

	Página
Agradecimientos	vii
Índice	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xiii
Notación	xvii
1 Introducción	1
1.1 <i>Antecedentes</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	3
1.3 <i>Tareas a desarrollar</i>	4
2 El mecanizado asistido por vibraciones	5
2.1 <i>Generalidades</i>	5
2.2 <i>Influencia de la frecuencia y la amplitud de vibración</i>	8
2.3 <i>Beneficios del mecanizado asistido por vibraciones</i>	10
2.4 <i>Fresado asistido por vibraciones</i>	14
3 Parte experimental	17
3.1 <i>Equipos</i>	17
3.1.1 <i>Fresadora</i>	17
3.1.2 <i>LMS Pimento</i>	17
3.1.3 <i>Plato dinamométrico Kistler</i>	18
3.1.4 <i>Durómetro</i>	19
3.1.5 <i>Rugosímetro</i>	20
3.2 <i>Pieza</i>	20
3.3 <i>Herramienta</i>	21
3.4 <i>Parámetros de corte</i>	21
3.5 <i>Variables experimentales</i>	22
3.6 <i>Caracterización de la vibración</i>	23
3.7 <i>Ejecución de los ensayos</i>	24
3.7.1 <i>Preparación</i>	24
3.7.2 <i>Pruebas experimentales</i>	24
4 Análisis de Resultados	27
4.1 <i>Medición de fuerzas</i>	27
4.1.1 <i>Influencia de la velocidad de avance</i>	28
4.1.2 <i>Influencia de la velocidad de corte</i>	31
4.2 <i>Medición de rugosidad superficial</i>	34
4.2.1 <i>Influencia del avance</i>	35
4.2.2 <i>Influencia de la velocidad de corte</i>	36
4.3 <i>Medición de vibraciones</i>	38
5 Conclusiones	43
6 Trabajos futuros	45
7 Bibliografía	47
Anexo. Resultados experimentales	A-1

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2-1. Mejora al introducir vibraciones en algunos procesos de mecanizado [8]	13
Tabla 3-1. Características técnicas de la fresadora	17
Tabla 3-2. Características del acelerómetro PCB Piezotronics 352C33	18
Tabla 3-3. Especificaciones técnicas plato Kistler modelo 9257B	19
Tabla 3-4. Especificaciones técnicas rugosímetro M1	20
Tabla 3-5. Composición de la aleación de aluminio 7075	20
Tabla 3-6. Parámetros de corte y nomenclatura de cada ensayo	22
Tabla 4-1. Resultados teóricos y experimentales de fuerzas	27
Tabla 4-2. Resultados de Ra teóricos y experimentales	34
Tabla 4-3. Variación de Ra entre la velocidad de corte mayor y menor	37
Tabla A-1. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 279$ mm/min	A-1
Tabla A-2. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 416$ mm/min	A-3
Tabla A-3. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 625$ mm/min	A-5
Tabla A-4. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 279$ mm/min	A-7
Tabla A-5. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 416$ mm/min	A-9
Tabla A-6. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 625$ mm/min	A-11
Tabla A-7. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 279$ mm/min	A-13
Tabla A-8. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 416$ mm/min	A-15
Tabla A-9. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 625$ mm/min	A-17

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1-1. Elemento vibrador [29]	2
Figura 1-2. Sistema VAM 2D no resonante [2]	3
Figura 2-1. Proceso de VAM 1D general	5
Figura 2-2. Proceso VAM 1D en varios instantes	6
Figura 2-3. Duty cycle en función del HSR [11]	6
Figura 2-4. Esquema VAM 2D general	7
Figura 2-5. Proceso de VAM 2D	7
Figura 2-6. Elipse en VAM 2D	8
Figura 2-7. Rugosidad superficial frente a frecuencia y avance [25]	9
Figura 2-8. Efecto de la frecuencia en la rugosidad superficial [25]	9
Figura 2-9. Tensión residual frente a frecuencia y avance [25]	9
Figura 2-10. Efecto de la frecuencia en la tensión residual [25]	9
Figura 2-11. Ancho de ranura en función de la frecuencia [12]	10
Figura 2-12. Ancho de ranura en función de la amplitud [12]	10
Figura 2-13. Comparación de fuerza de corte entre proceso convencional y con vibración [2]	10
Figura 2-14. Fuerza en función de la distancia de corte [23]	11
Figura 2-15. Comparación fuerzas con y sin vibración en función de la velocidad de corte [33]	11
Figura 2-16. Fuerza de corte en función de la velocidad de giro [22]	12
Figura 2-17. Fuerza de corte en función del avance [22]	12
Figura 2-18. Comparación generación de rebaba entre proceso convencional, con vibración 1D y vibración elíptica [24]	13
Figura 2-19. Fotografías SEM de rebaba en el borde de la superficie de corte. a) Corte convencional	14
Figura 2-20. Fresado periférico	14
Figura 2-21. Fresado frontal	14
Figura 2-22. Fresado combinado	14
Figura 2-23. Contacto pieza-herramienta en un proceso de fresado con vibraciones	15
Figura 3-1. Fresadora CM-60	17
Figura 3-2. Equipo LMS Pimento	18
Figura 3-3. Acelerómetro PCB Piezotronics 352C33	18
Figura 3-4. Plato Kistler con los tres ejes de medición	18
Figura 3-5. Amplificador multicanal tipo 5070	18
Figura 3-6. Representación de las fuerzas medidas	19
Figura 3-7. Durómetro M4U-025	19

Figura 3-8. Rugosímetro Mahr M1	20
Figura 3-9. Pieza para realizar los ensayos	21
Figura 3-10. Herramienta seleccionada para el fresado	21
Figura 3-11. Velocidades de giro fresadora CM-60	21
Figura 3-12. Velocidades de avance fresadora CM-60	21
Figura 3-13. Frecuencia del dispositivo excitador	23
Figura 3-14. Prueba para determinar la frecuencia del excitador	24
Figura 3-15. Pieza inicial con los cuatro agujeros	24
Figura 3-16. Mecanizado del escalón	24
Figura 3-17. Excitador en contacto con la herramienta	25
Figura 3-18. Acelerómetro ubicado en el husillo	25
Figura 3-19. Acelerómetros en dirección longitudinal, transversal y vertical	25
Figura 3-20. Medición en el husillo de una prueba realizada en vacío	25
Figura 3-21. Montaje del rugosímetro en la fresadora	26
Figura 3-22. Microscopio óptico SMZ 800	26
Figura 3-23. Estado de la herramienta al finalizar los ensayos	26
Figura 3-24. Comprobación del diámetro de la herramienta	26
Figura 4-1. Fuerza media para $v_c = 24,19$ m/min	28
Figura 4-2. Fuerza media para $v_c = 29,21$ m/min	28
Figura 4-3. Fuerza media para $v_c = 39,26$ m/min	29
Figura 4-4. Fuerza máxima para $v_c = 24,19$ m/min	29
Figura 4-5. Fuerza máxima para $v_c = 29,21$ m/min	29
Figura 4-6. Fuerza máxima para $v_c = 39,26$ m/min	30
Figura 4-7. Fuerza media para $v_f = 279$ mm/min	31
Figura 4-8. Fuerza media para $v_f = 416$ mm/min	31
Figura 4-9. Fuerza media para $v_f = 625$ mm/min	32
Figura 4-10. Fuerza máxima para $v_f = 279$ mm/min	32
Figura 4-11. Fuerza máxima para $v_f = 416$ mm/min	32
Figura 4-12. Fuerza máxima para $v_f = 625$ mm/min	33
Figura 4-13. Valores de R_a en función del avance	35
Figura 4-14. Valores de R_a para $v_f = 279$ mm/min en función de v_c	36
Figura 4-15. Valores de R_a para $v_f = 416$ mm/min en función de v_c	36
Figura 4-16. Valores de R_a para $v_f = 625$ mm/min en función de v_c	37
Figura 4-17. Ejemplo de error de medición en la dirección vertical	38
Figura 4-18. Frecuencias en el husillo para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min	39
Figura 4-19. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min	39
Figura 4-20. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min	39

Figura 4-21. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	40
Figura 4-22. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	40
Figura 4-23. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	41
Figura 4-24. Serie de armónicos producidos con $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	41
Figura A-1. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-2
Figura A-2. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-2
Figura A-3. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-2
Figura A-4. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-4
Figura A-5. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-4
Figura A-6. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-4
Figura A-7. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-6
Figura A-8. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-6
Figura A-9. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-6
Figura A-10. Frecuencias en el husillo para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-8
Figura A-11. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-8
Figura A-12. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-8
Figura A-13. Frecuencias en el husillo para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-10
Figura A-14. Frecuencias dirección longitudinal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-10
Figura A-15. Frecuencias dirección transversal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-10
Figura A-16. Frecuencias en el husillo para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-12
Figura A-17. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-12
Figura A-18. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=29,21$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-12
Figura A-19. Frecuencias en el husillo para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-14
Figura A-20. Frecuencias en el dirección longitudinal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-14
Figura A-21. Frecuencias en el dirección transversal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=279$ mm/min	A-14
Figura A-22. Frecuencias en el husillo para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-16
Figura A-23. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-16
Figura A-24. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=416$ mm/min	A-16
Figura A-25. Frecuencias en el husillo para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-18
Figura A-26. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-18
Figura A-27. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=39,26$ m/min y $v_f=625$ mm/min	A-18

Notación

a	Semieje mayor elipse
arccos	Función arcocoseno
A	Amplitud
b	Semieje menor elipse
cos	Función coseno
D	Diámetro de la herramienta
DC	Duty cycle
f	Frecuencia
f	Avance
f_z	Avance por diente
F_c	Fuerza de corte
h_1	Espesor de viruta indeformada
HSR	Ratio de velocidad horizontal
K_t	Constante de corte
N	Velocidad angular
p	Penetración
p_a	Profundidad axial
p_r	Profundidad radial
P_c	Potencia de corte
sen	Función seno
T	Período
v_c	Velocidad de corte
v_f	Velocidad de avance
V	Velocidad
VAM	Mecanizado asistido por vibraciones
Z	Número de filos de la fresa

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Con el rápido desarrollo de equipos aeroespaciales, de bioingeniería y maquinaria de precisión se hace difícil satisfacer la creciente demanda en cuanto a precisión y calidad de la superficie final con las operaciones de mecanizado convencionales. Por este motivo es necesario considerar otras alternativas, como es el hecho de introducir vibraciones en el proceso de mecanizado.

El mecanizado asistido por vibraciones, conocido con las siglas VAM (*Vibration Assisted Machining*), consiste en combinar la operación de mecanizado con una vibración de alta frecuencia y baja amplitud en la herramienta con el objetivo de mejorar el proceso de fabricación. Este método se ha desarrollado e investigado en estos últimos años y se ha aplicado en numerosas operaciones de mecanizado como por ejemplo torneado, fresado, taladrado, etc.

En función del movimiento vibratorio de la herramienta se puede distinguir entre mecanizado asistido por vibraciones en una y dos direcciones (VAM 1D y VAM 2D) [8]. En el proceso de VAM 1D la herramienta es conducida armónicamente mediante una trayectoria recta paralela al movimiento de corte, mientras que en el VAM 2D la herramienta describe una trayectoria elíptica.

Los sistemas de VAM 1D se usan tanto en mecanizado de precisión de superficies ópticas [18][19][28][30][34][45] como en procesos de mecanizado convencionales con profundidades de corte de hasta 0,5 mm [6][15][17][22][43]. Estos sistemas tienden a operar a unas frecuencias de 20 kHz o 40 kHz aproximadamente y unas amplitudes en el rango de 3 a 20 μm .

En función de la frecuencia utilizada en el proceso se puede distinguir entre sistemas resonantes y no resonantes.

Dentro de los sistemas de VAM 1D no resonantes Han et al. (1998) [16] desarrollaron uno en el cual se integran dos actuadores piezoeléctricos en la herramienta de corte, uno de ellos para generar la vibración de corte ultrasónica y el otro para compensar los errores del proceso de corte. La piezoelectricidad es un fenómeno que consiste en la aparición de cargas eléctricas en las caras de determinados cristales cuando se ejerce sobre ellos una presión o una tracción mecánica. Para generar vibraciones se usa el efecto piezoeléctrico inverso, de tal forma que se aplica un campo eléctrico sobre el material piezoeléctrico y éste vibra produciendo una frecuencia. Se aplicaban a los actuadores señales senoidales con el objetivo de generar una frecuencia de 20 kHz. Mediante la realización de experimentos mostraron que este sistema integrado de corte es efectivo en términos de redondez y rugosidad superficial, mejorando los resultados del proceso convencional y del proceso con vibración ultrasónica sin la compensación del error.

Otro ejemplo de sistema VAM 1D no resonante fue desarrollado por Overcash y Cuttino (2003) [32]. Dicho experimento consistía en utilizar múltiples actuadores piezoeléctricos operando cada uno a una fracción de la frecuencia resultante, con el objetivo de disminuir el calor generado en dichos actuadores.

Los sistemas de VAM 2D normalmente se usan sólo para aplicaciones de mecanizado con unos valores de profundidades de corte desde 1 μm a 50 μm [10][11][31][36][35][39][40].

Dentro del tipo de VAM 2D resonante, Moriwaki y Shamoto (1995) [29] diseñaron un elemento vibrador trabajando a una frecuencia de 20 kHz mediante la excitación de dos láminas piezoeléctricas (PZT) que se encontraban pegadas en sus superficies laterales. Al aplicar dos voltajes senoidales a los PZT's con una fase desplazada, el conjunto vibraba de tal forma que la punta de la herramienta describía un movimiento elíptico. En la Figura 1-1 se muestra un esquema del mismo. Realizaron el proceso de corte mediante 3 métodos distintos:

- Proceso de corte convencional
- Proceso de corte con vibración convencional
- Proceso de corte con vibración elíptica

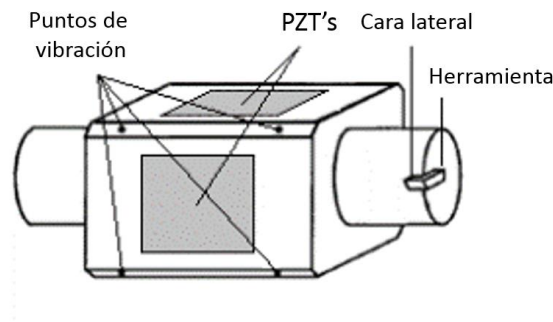


Figura 1-1. Elemento vibrador [29]

Los resultados mostraron varios aspectos a tener en cuenta:

- Aplicando vibración elíptica se reducían considerablemente el espesor de viruta y la fuerza de corte en comparación con los otros procedimientos.
- La formación de rebaba se eliminaba aplicando vibración elíptica.
- La rugosidad superficial generada mediante vibración elíptica era pequeña.

A partir de este diseño, Moriwaki y Shamoto (2002) [37] lo perfeccionaron y desarrollaron un sistema de control de vibración. En esta ocasión se utilizaban cuatro láminas piezoeléctricas como actuadores y dos láminas pequeñas como sensores y mediante el sistema de control se pretendía evitar la posible interferencia entre las dos señales aplicadas. Se realizó un ensayo de corte de acero endurecido y los resultados fueron satisfactorios, ya que se eliminó dicha interferencia y se consiguió estabilizar la vibración elíptica (las amplitudes y la diferencia de fase se mantenían constantes). Además, se mejoró la precisión de forma a menos de $0,2 \mu\text{m}$.

En los sistemas de VAM 2D no resonantes, las señales senoidales que se aplican a los actuadores piezoeléctricos hacen que se expandan y contraigan pero a una frecuencia por debajo de la primera frecuencia natural del sistema. El movimiento lineal que producen se convierte en un movimiento elíptico mediante un acoplamiento mecánico [8].

Un ejemplo fue diseñado por Ahn et al. (1999) [2], el cual usaba dos actuadores PZT dispuestos de forma perpendicular entre sí en dos ejes distintos. De esta forma al excitarlos con dos señales senoidales con una diferencia de fase, se creaba el movimiento elíptico. En la Figura 1-2 se muestra la instalación experimental diseñada.

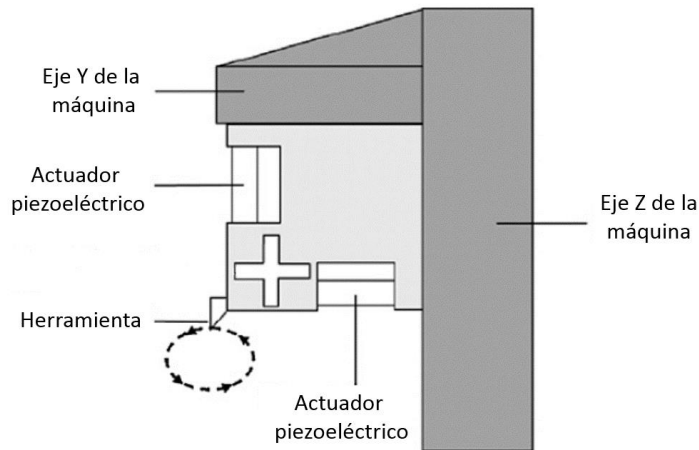


Figura 1-2. Sistema VAM 2D no resonante [2]

Como se puede observar, todos estos experimentos tienen como objetivo demostrar la mejora en los resultados con respecto al proceso convencional. Hay ocasiones también en las que las operaciones convencionales no pueden realizar el proceso de una forma efectiva. Por ejemplo, si el material a mecanizar es polímero reforzado con fibras, las operaciones de torneado, fresado y taladrado pueden llegar a dañar el material, como por ejemplo provocando la fragmentación de fibras o la rotura de la matriz. Para solucionar esto, Xu W. y Zhang L. (2014) [44] desarrollaron un sistema de vibración elíptica capaz de realizar el proceso de manera eficiente. Otro ejemplo es el mecanizado del acero inoxidable martensítico AISI 420, el cual exige que la herramienta sea lo suficientemente dura, tenga mucha potencia y se usen grandes cantidades de lubricante. Abootorabi Zarchi MM. et al. (2013) [1] mostraron que introducir vibraciones en el proceso de fresado es una buena alternativa para realizar la operación de forma efectiva.

Lo más habitual a la hora de realizar un proceso de VAM es trabajar con frecuencias elevadas (20 - 40 kHz), aunque también hay casos con frecuencias menores. Chern y Chang (2011) [12] realizaron varios ensayos variando la frecuencia entre 0 y 10 kHz para determinar el efecto de ésta y comparar los distintos resultados en una operación de fresado combinado de una aleación de aluminio. Ahn et al. (1999) [2] desarrollaron un sistema vibratorio que operaba a una frecuencia de 1 kHz, con el objetivo de observar las diferencias entre el proceso convencional y el proceso con vibraciones.

1.2 Objetivos

El objetivo del trabajo consistirá en desarrollar un sistema para realizar una operación de mecanizado introduciendo vibraciones en la herramienta. En este caso será una operación de fresado combinado. También se realizará el mismo proceso sin el sistema de vibración, y se medirán rugosidades superficiales y fuerzas durante los dos procesos. Estos resultados serán comparados junto con los teóricos para poder observar si existe alguna mejora o no en el proceso con vibraciones respecto al proceso convencional.

1.3 Tareas a desarrollar

Lo más importante es definir un sistema capaz de generar vibraciones en la herramienta para poder realizar el proceso de forma efectiva y comparar posteriormente con el proceso convencional. La vibración generada deberá ser lo más alta posible en frecuencia y tener una amplitud pequeña para no dañar la herramienta.

Se seleccionará sólo un material para la pieza a mecanizar, ya que la importancia de este trabajo radica en comparar entre los dos procesos y no entre varios materiales. También será importante seleccionar la herramienta que se usará para el mecanizado. Los valores recomendados por el fabricante de la herramienta y los valores recomendados por la norma *ISO 8688 Tool life testing in milling Part 2* determinarán un rango de valores para realizar los ensayos (siempre y cuando sea posible trabajar con ellos en la máquina herramienta).

Una vez que se mecanice se van a medir rugosidades y fuerzas y se compararán entre los dos procesos y los valores obtenidos de forma teórica. Para medir las fuerzas en el proceso se usará un plato dinamométrico de marca Kitsler, por lo que antes de realizar los ensayos será necesario hacer el montaje del plato en la fresadora.

Se caracterizó la fuente de vibración para conocer la frecuencia a la cual se iba a asistir el proceso de mecanizado. Para ello y para la medición de vibraciones en la máquina herramienta durante el mecanizado se emplean acelerómetros y el analizador de señales Pimento.

Una vez obtenidos todos los resultados, se compararán con el fin de observar si existe una mejora o no en el proceso asistido con vibraciones respecto al proceso convencional, para todas las condiciones anteriormente citadas.

2 EL MECANIZADO ASISTIDO POR VIBRACIONES

2.1 Generalidades

Como ya se comentó anteriormente en el apartado 1.1, existen fundamentalmente dos tipos de mecanizado asistido por vibraciones, en función de la vibración durante el proceso. Para el caso 1D la vibración se produce en un eje en la misma dirección de corte. Si además de esto se tiene otra vibración en el eje perpendicular, lo que se tiene es el caso 2D, en el que la herramienta pasaría de tener un movimiento lineal a describir un movimiento elíptico.

La Figura 2-1 muestra un esquema del proceso VAM 1D de forma general. La herramienta vibra en la misma dirección en que se mueve la herramienta durante el mecanizado.

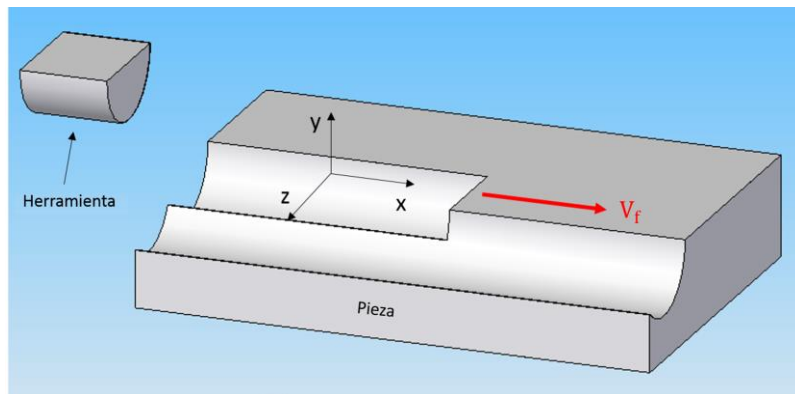


Figura 2-1. Proceso de VAM 1D general

Al tener un contacto intermitente entre herramienta y pieza de trabajo, en estos sistemas se suele hablar de ciclos de mecanizado de VAM. Hay algunos parámetros que se utilizan normalmente para definir y caracterizar un ciclo. Éstos son:

- **V_{crit}**: la velocidad crítica se define como aquella por encima de la cual el corte pasa a ser continuo.

$$V_{crit} = 2\pi f A \quad (2.1)$$

- **F_{UP}**: este término se refiere a la distancia recorrida por la herramienta en un ciclo de vibración, en relación con la pieza de trabajo.

$$F_{UP} = \frac{V}{f} \quad (2.2)$$

- **HSR (Horizontal Speed Ratio)**: es la proporción entre la velocidad de alimentación de la pieza de trabajo y el máximo de la velocidad de vibración horizontal de la herramienta.

$$HSR = \frac{V}{2\pi f A} \quad (2.3)$$

Se deduce a partir de la expresión que el corte no interrumpido (continuo) se produce para valores de $HSR \geq 1$.

- **DC₁ (Duty Cycle):** en 1D, se define como el porcentaje de cada ciclo de vibración en el cual la herramienta se encuentra cortando la pieza de trabajo (Figura 2-2).

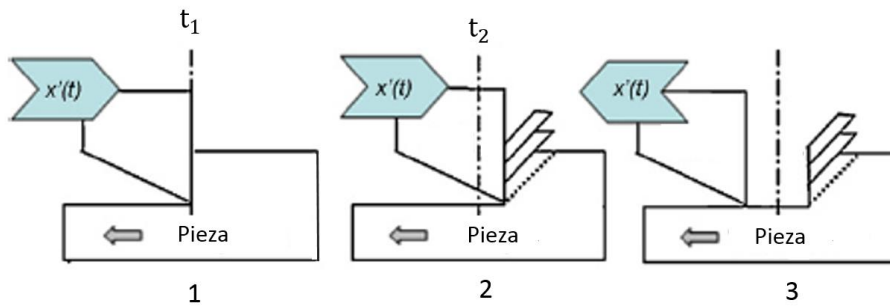


Figura 2-2. Proceso VAM 1D en varios instantes

$$DC_1 = \frac{t_2 - t_1}{T} \quad (2.4)$$

Para el caso de corte continuo 1D como para el mecanizado convencional la herramienta está siempre en contacto con la pieza, por lo tanto tendrán un *duty cycle* igual a 1.

En la gráfica de la Figura 2-3 se observa una relación entre valores de *duty cycle* y valores del HSR, obtenida por Cerniway MA (2005) [11].

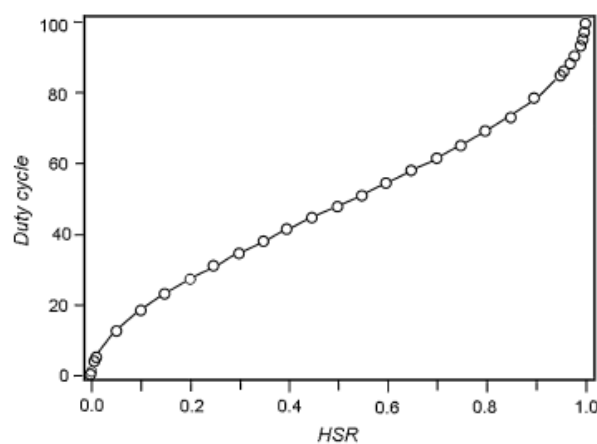


Figura 2-3. Duty cycle en función del HSR [11]

Si además de tener una vibración horizontal con el consiguiente movimiento lineal de la herramienta se añade un movimiento vertical se tiene el caso de VAM 2D. La vibración en dos ejes produce que la herramienta describa un movimiento elíptico (Figura 2-4).

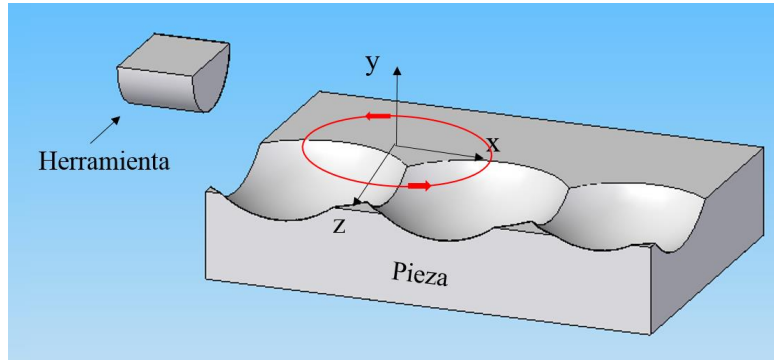


Figura 2-4. Esquema VAM 2D general

En la Figura 2-5 se ilustra de forma esquemática una operación con la herramienta describiendo un movimiento elíptico.

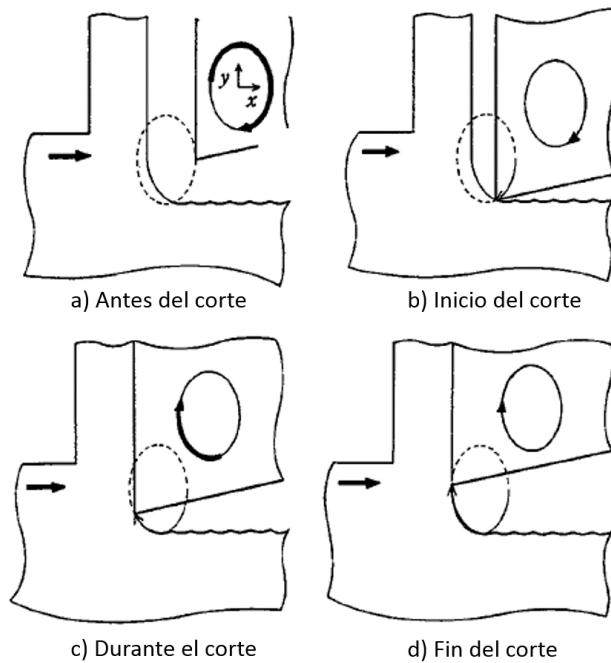


Figura 2-5. Proceso de VAM 2D

Las definiciones y cálculos de los parámetros de velocidad crítica, F_{up} y HSR se realizan de la misma forma que anteriormente para el caso 1D (ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3).

El concepto de *duty cycle* es el mismo, la fracción en la que la herramienta se encuentra mecanizando. Por lo tanto en este caso vendría dado por el cociente de la longitud de la elipse en contacto con la pieza entre una aproximación del perímetro de la elipse.

$$DC_2 = \frac{\text{arc}(\theta_2 - \theta_1)}{2\pi\sqrt{\frac{(a^2 + b^2)}{2}}} \quad (2.5)$$

Los ángulos θ_1 y θ_2 así como los parámetros de la elipse vienen definidos gráficamente en la Figura 2-6.

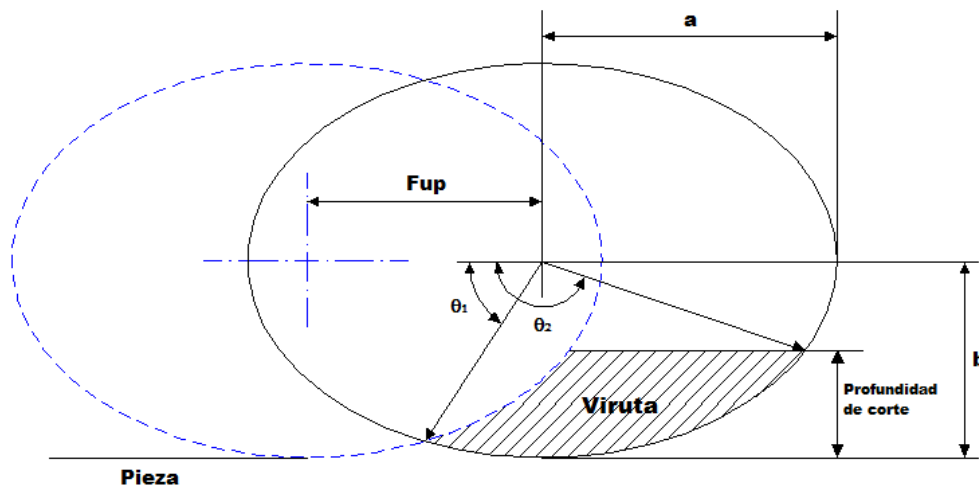


Figura 2-6. Elipse en VAM 2D

2.2 Influencia de la frecuencia y la amplitud de vibración

En un proceso de mecanizado asistido por vibraciones, los valores de la frecuencia y amplitud pueden modificar la eficacia del mecanizado. Lo más usual es introducir una vibración con una frecuencia elevada (entre 20 y 40 kHz) y una amplitud pequeña, pero esto no quiere decir que emplear una frecuencia más alta implique mejores resultados finales. Hay que estudiar el conjunto de parámetros de corte, junto con la frecuencia y la amplitud, que hacen favorable y efectivo el proceso de mecanizado.

A la hora de realizar un experimento con vibraciones, lo más usual es establecer la frecuencia como un parámetro fijo. Zhou M. et al. (2003) [45] realizaron un proceso a una frecuencia fija de 40 kHz y obtuvieron los valores de rugosidad superficial final, la cual mejoraba con respecto al proceso sin vibraciones pero en distintos grados en función de las condiciones de corte.

Sin embargo, también se puede modificar el proceso variando el valor de la frecuencia y ver de qué forma afecta al resultado final. Maurotto A. y Wickramarachchi T. (2016) [25] realizaron una operación de fresado obteniendo valores de rugosidad superficial y tensión residual para distintos valores de frecuencia. En el caso de la rugosidad se observaba que, para un valor fijo del avance, el resultado empeoraba conforme aumentaba la frecuencia (Figuras 2-7 y 2-8). Para el caso de la tensión residual, alcanzaba el valor más bajo en torno a una frecuencia de 40 kHz, manteniendo fijo el avance (Figuras 2-9 y 2-10).

Junto con la frecuencia, es importante averiguar cómo afecta al proceso el valor de la amplitud de vibración.

Para un material de polímero reforzado con fibras, Xu W. y Zhang L. (2014) [44] mostraron que las fuerzas de corte disminuyen al aumentar la frecuencia, aunque una frecuencia demasiado elevada puede llegar a provocar grandes daños superficiales. El incremento de la amplitud también reduce las fuerzas de corte, pero a medida que aumente la amplitud aumentará la fricción entre la cara de la herramienta y la superficie terminada.

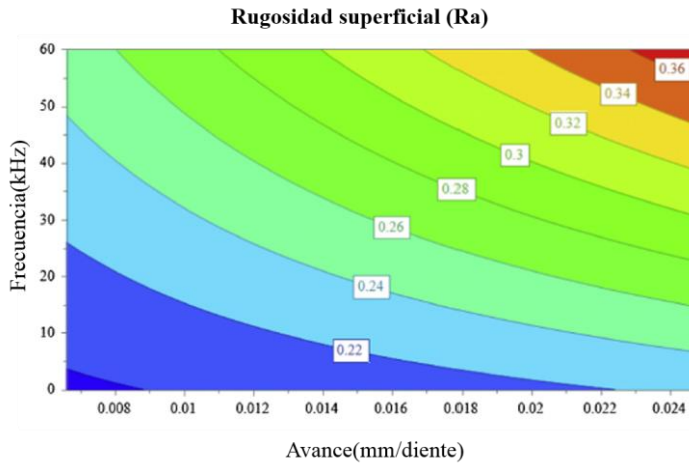


Figura 2-7. Rugosidad superficial frente a frecuencia y avance [25]

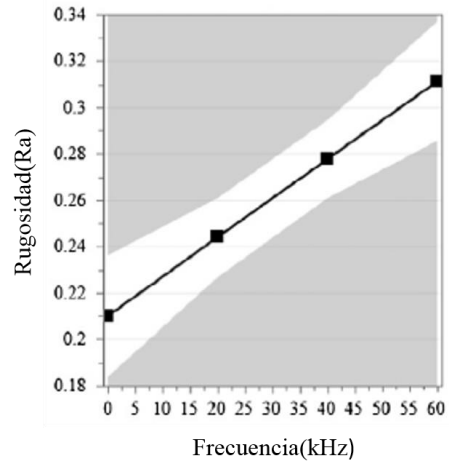


Figura 2-8. Efecto de la frecuencia en la rugosidad superficial [25]

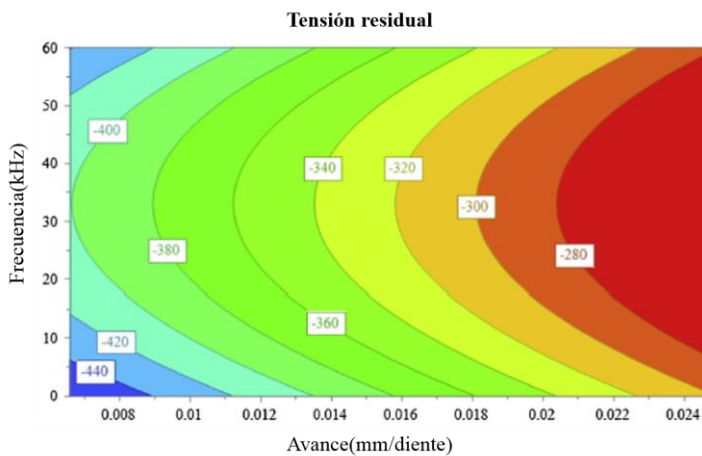


Figura 2-9. Tensión residual frente a frecuencia y avance [25]

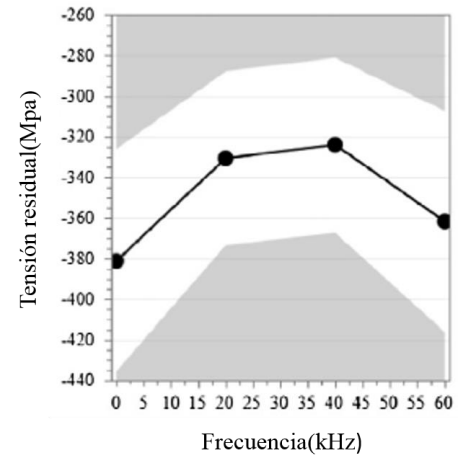


Figura 2-10. Efecto de la frecuencia en la tensión residual [25]

Para estudiar la influencia de la frecuencia y de la amplitud, Chern y Chang (2011) [12] desarrollaron un proceso de ranurado cuyo objetivo era optimizar los parámetros para obtener el menor valor del ancho de la ranura. Para los distintos valores de frecuencia (entre 0 y 10 kHz) y amplitud (entre 0 y 0,01 mm) empleados, se compararon los anchos de ranura obtenidos. El valor más pequeño medido en la ranura se producía para una frecuencia de 1 kHz, siendo 10 kHz la frecuencia más alta empleada en el experimento (Figura 2-11). En función de la amplitud, el valor óptimo buscado sí se producía para la amplitud más alta utilizada (Figura 2-12).

Del análisis de los trabajos realizados por otros autores se puede plantear que al aumentar la frecuencia dentro de un mismo proceso, las fuerzas tienden a disminuir respecto al proceso convencional pero pueden llegar a provocar un peor resultado en la superficie final. En el caso de incrementar la amplitud (dentro de un rango de amplitudes pequeñas) parece que puede provocar una mejora en los resultados finales.

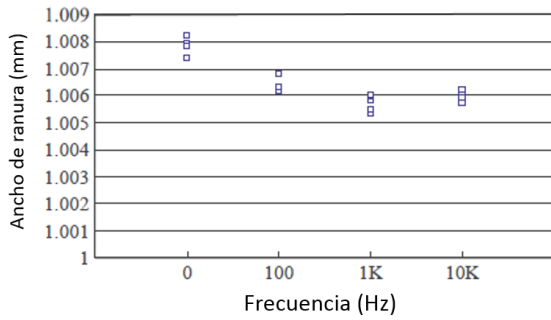


Figura 2-11. Ancho de ranura en función de la frecuencia [12]

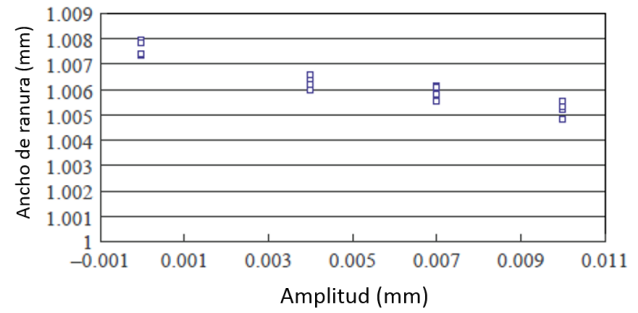


Figura 2-12. Ancho de ranura en función de la amplitud [12]

2.3 Beneficios del mecanizado asistido por vibraciones

Diversos experimentos y procedimientos realizados sobre este proceso han conseguido mostrar algunas ventajas del mecanizado asistido por vibraciones con respecto al proceso de mecanizado convencional. Éstas se pueden resumir en las siguientes:

- **Reducción de las fuerzas resultantes en el proceso.**

De forma general se produce una reducción en las fuerzas involucradas en el proceso de mecanizado. Esto se debe a que la herramienta se encuentra menos tiempo en contacto con la pieza de trabajo. Para observar esta mejora, como se comentó en el apartado 1.1, Ahn J. et al. (1999) [2] llevaron a cabo operaciones de mecanizado con un sistema basado en dos elementos piezoeléctricos colocados perpendicularmente en la máquina para conseguir la vibración y compararon ambos procesos (Figura 1-2). En la Figura 2-13 se muestra gráficamente la comparación de fuerzas de ambos procesos.

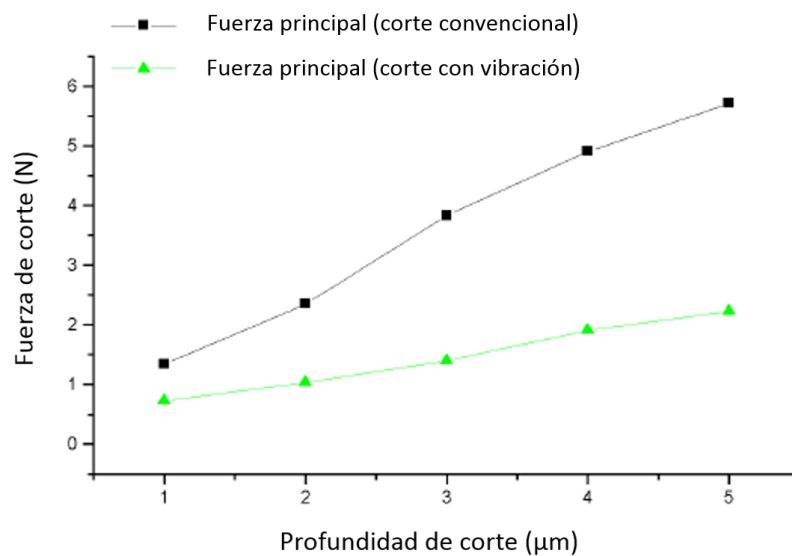


Figura 2-13. Comparación de fuerza de corte entre proceso convencional y con vibración [2]

En este caso se comparó en función de la profundidad de corte. Muchos investigadores lo hacen también en función de la distancia de corte. Por ejemplo, Ma C. et al. (2004) [23] representaron gráficamente (Figura 2-14) la diferencia entre el proceso convencional, el proceso con vibración 1D y el proceso con vibración 2D de un mecanizado de una pieza de aluminio trabajando a una frecuencia de 18,66 kHz. En la Figura 2-14 se observa también que las fuerzas producidas en el proceso con vibración 2D son menores que las producidas en el proceso con vibración 1D.

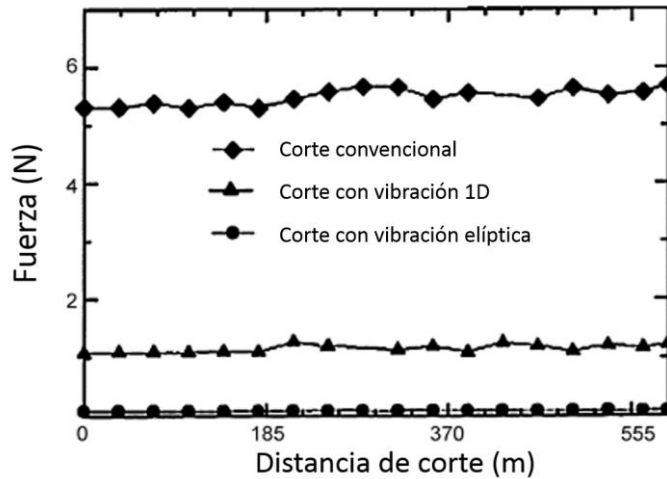


Figura 2-14. Fuerza en función de la distancia de corte [23]

Otro aspecto interesante es comparar la diferencia en función de la velocidad de corte. En la Figura 2-15 se muestran los resultados del mecanizado de una pieza de aleación de titanio, donde se observa una reducción significativa entre los dos procesos [33]. Otro ejemplo se puede observar en las Figuras 2-16 y 2-17, correspondientes a ensayos realizados por Liu C.S. et al. (2002) [22] y comparando las fuerzas en función de la velocidad de corte y del avance.

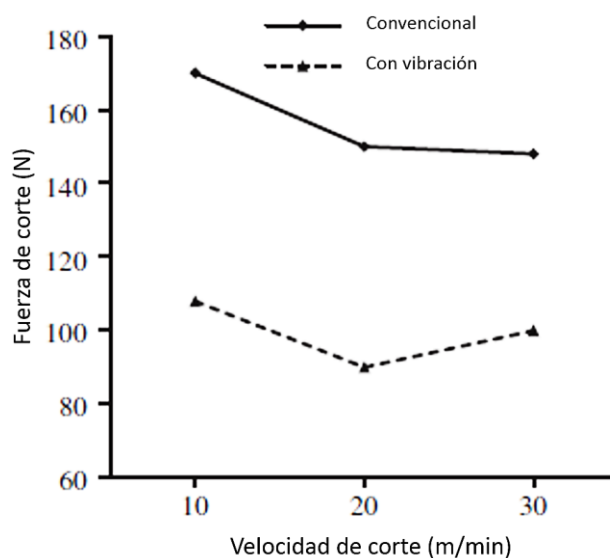


Figura 2-15. Comparación fuerzas con y sin vibración en función de la velocidad de corte [33]

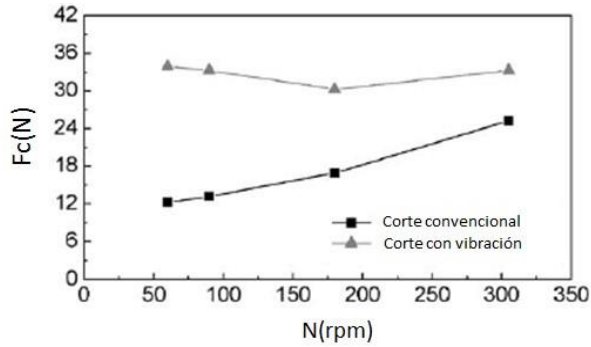


Figura 2-16. Fuerza de corte en función de la velocidad de giro [22]

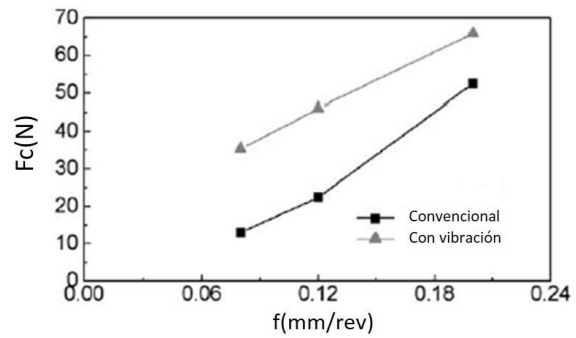


Figura 2-17. Fuerza de corte en función del avance [22]

- **Mayor vida de las herramientas.**

Hay casos en los que la aplicación de vibraciones en el proceso de mecanizado tiene como consecuencia una duración de vida mayor de las herramientas. Esto se debe a la mejora comentada anteriormente, la posibilidad de que se produzcan fuerzas menores durante el proceso y por lo tanto las herramientas sufran un desgaste menor. Dicho aumento se ha observado fundamentalmente en herramientas de diamante mecanizando metales ferrosos.

Zhou et al. (2003) [45] mostraron en una investigación que el corte con vibraciones ultrasónicas presentaba ciertas ventajas respecto al proceso convencional mediante un ensayo de mecanizado de un acero inoxidable con una herramienta de diamante policristalino. Una de estas ventajas era que el desgaste de las herramientas podía ser reducido considerablemente, debido fundamentalmente a la reducción de las fuerzas y de la temperatura de corte.

La duración de la vida de la herramienta también mejora para herramientas de carburo mecanizando materiales frágiles, aceros y metales duros. Weber et al. (1984) [42] realizaron una operación de torneado de vidrio con una herramienta de carburo K10/HG 012. A partir de ella mostraron que es posible incrementar más de 20 veces la vida de la herramienta realizando el proceso con vibraciones ultrasónicas.

- **Precisión y superficie final mejoradas.**

Como se ha comentado anteriormente, el mecanizado asistido por vibraciones puede mejorar los resultados finales en términos de precisión y rugosidad de las superficies finales con respecto al proceso convencional [7][9][11][28][35][38]. En la Tabla 2-1 se ilustran resultados de algunos experimentos en los que se puede apreciar una mejora en la rugosidad superficial del proceso de mecanizado con vibraciones [8].

- **Reducción de rebaba.**

Este hecho es importante ya que la formación de rebaba no sólo disminuye la precisión de la pieza final sino que además aumenta el coste del mecanizado. Ma et al. (2004) [24] investigaron de forma teórica y experimental la influencia de las vibraciones en este hecho. El desarrollo consistía en comparar entre tres procesos y analizar los resultados. Los procesos eran mecanizado convencional, mecanizado asistido con vibración convencional y por último con vibración elíptica. Operando con una frecuencia de 18,66 kHz y una velocidad de corte comprendida entre 3,94 m/min y 18,3 m/min los resultados mostraron que la cantidad de rebaba generada era menor usando el procedimiento de vibración elíptica. Dichos resultados

se pueden observar en las Figuras 2-18 y 2-19.

Tabla 2-1. Mejora al introducir vibraciones en algunos procesos de mecanizado [8]

Material trabajo	Herramienta	Proceso	Profundidad de corte (μm)	Rugosidad superficial VAM (μm)	Rugosidad superficial convencional (μm)
Cristal de silicio	Diamante	1D	2	Ra : 0,100	Ra : 0,260
CFRP	Diamante	1D	200	Ra : 2,80	Ra : 4,00
LY12 (aluminio)	Diamante policristalino	1D	150	Ra : 0,63	Ra: 0,94
Acero inoxidable 304	Diamante policristalino	1D	20	Ra : 0,152	Ra : 0,239
PMMA (CR-39)	Diamante	1D	2	Ra : 0,1	Ra : 0,2
Acero	Diamante	2D	3,5	Rmax: 0,04	Rmax: 0,52
Latón	Diamante	2D	1	Rmax : 0,04	Rmax : 1,00
Inconel	Carburo	1D	800	Ra : 0,284	Ra : 0,510

CFRP = plástico reforzado con fibras de carbono; PMMA = polimetilmetacrilato; Rmax= rugosidad pico a valle; Ra = rugosidad superficial.

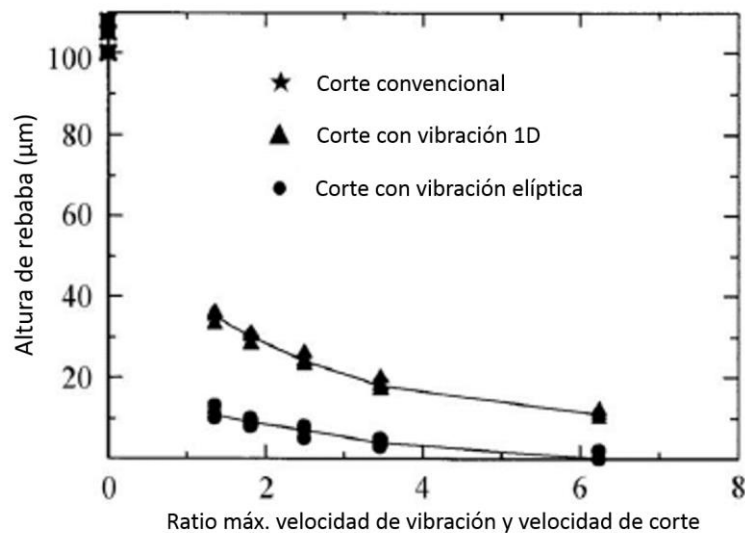


Figura 2-18. Comparación generación de rebaba entre proceso convencional, con vibración 1D y vibración elíptica [24]

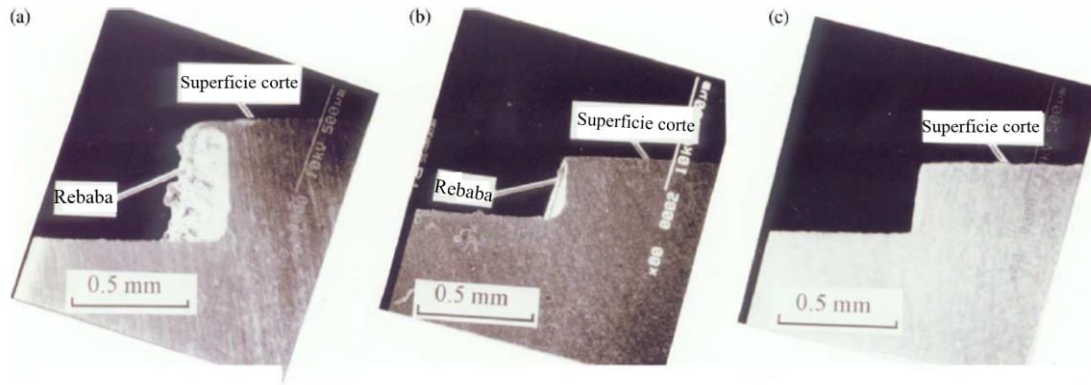


Figura 2-19. Fotografías SEM de rebaba en el borde de la superficie de corte. a) Corte convencional b) Corte con vibración 1D c) Corte con vibración elíptica [24]

2.4 Fresado asistido por vibraciones

El fresado es una operación de mecanizado sin simetría de revolución en la que el movimiento de corte es realizado por la herramienta y los movimientos de avance y penetración por la pieza o la herramienta.

Según las características de la operación se puede distinguir entre fresado periférico, frontal o combinado.

- *Fresado periférico*: el eje de la fresa se encuentra paralelo a la superficie a mecanizar (Figura 2-20).
- *Fresado frontal*: el eje de la fresa se encuentra perpendicular a la superficie a mecanizar (Figura 2-21).
- *Fresado combinado*: en esta operación se mecanizan dos superficies, una paralela al eje de la fresa y otra perpendicular. La fresa tiene filos de corte en la parte frontal y en el contorno (Figura 2-22).

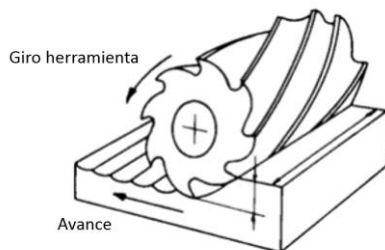


Figura 2-20. Fresado periférico

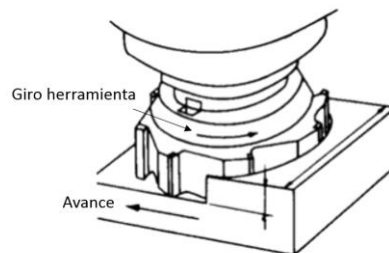


Figura 2-21. Fresado frontal

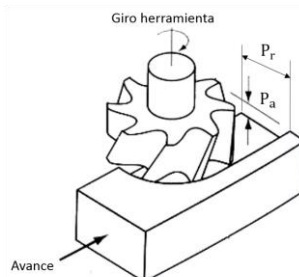


Figura 2-22. Fresado combinado

En la Figura 2-23 se muestra un esquema del proceso de fresado con vibraciones. La herramienta viene representada por un círculo y la vibración está aplicada en la dirección de avance (eje Y). El ángulo θ representa el instante en que la herramienta toca con la pieza [1].

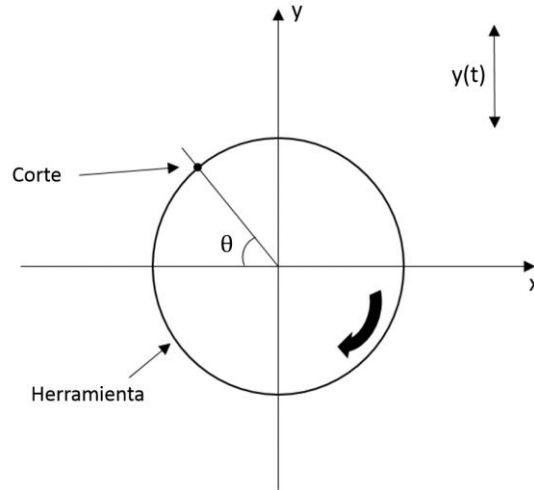


Figura 2-23. Contacto pieza-herramienta en un proceso de fresado con vibraciones

El movimiento de vibración en la dirección y viene dado de la siguiente forma:

$$y(t) = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t) \quad (2.6)$$

donde A y f corresponden a la amplitud y frecuencia de vibración respectivamente. Derivando esta ecuación se puede obtener la velocidad de vibración de la pieza:

$$V_v = 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (2.7)$$

La separación de la herramienta y la pieza ocurre cuando la velocidad de vibración de la pieza en la dirección de vibración supera la velocidad de corte de la herramienta (v). En el instante de separación se tiene:

$$v_{cr} \cos \theta + 2\pi f A \cos(\omega t) = 0 \quad (2.8)$$

Para alcanzar el punto de separación, la velocidad máxima de vibración tiene que ser igual a la velocidad de corte de la herramienta en la misma dirección. De esta forma se obtiene:

$$v_{cr} \cos \theta = 2\pi f A \quad \rightarrow \quad v_{cr} = \frac{2\pi f A}{\cos \theta} \quad (2.9)$$

En el caso con vibraciones la velocidad de avance viene dada mediante la ecuación (2.10). A partir de ella se puede calcular el avance por diente, f_z , mediante la ecuación (2.11).

$$v_{f,total} = v_f + 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (2.10)$$

$$f_z = \frac{v_f + 2\pi f A \cos(2\pi f t)}{N \cdot Z} \quad (2.11)$$

Una vez que se tiene el avance por diente, es posible calcular el espesor de viruta indeformada de la siguiente forma:

$$h_1 = f_z \sin \theta = \left(\frac{v_f + 2\pi f A \cos(2\pi f t)}{N \cdot Z} \right) \sin \theta \quad (2.12)$$

Conociendo el espesor de viruta indeformada en un proceso de fresado asistido por vibraciones se puede obtener una relación para determinar la fuerza principal de corte (fuerza tangencial), expresada en la ecuación (2.13).

$$F_c = K_t \cdot p_a \cdot h_1 \quad (2.13)$$

donde p_a es la profundidad axial de corte y K_t una constante de corte.

La frecuencia empleada dependerá de las características y limitaciones del proceso. Se pueden usar desde frecuencias relativamente pequeñas (0 - 1 kHz) [12] a frecuencias más elevadas (entre 40 y 60 kHz) [21], aunque lo más usual es generar una frecuencia alrededor de 20 kHz en el proceso.

A la hora de generar las vibraciones hay distintas formas, aunque lo más habitual es utilizar materiales piezoeléctricos. El fresado con vibraciones busca mejorar los resultados y minimizar costes con respecto al fresado convencional.

También es posible realizar este tipo de proceso junto con otro distinto para alcanzar dicho objetivo. Por ejemplo es posible combinar el proceso con vibraciones con un proceso de mecanizado térmicamente mejorado. De esta forma, se utiliza una fuente externa de calor, la cual aumenta la temperatura en la zona de corte de forma local. El uso de estos dos métodos conjuntamente puede llegar a reducir las fuerzas y obtener mejores resultados finales [14].

3 PARTE EXPERIMENTAL

El trabajo realizado comprende una importante parte experimental que será comentada a continuación haciendo referencia a la máquina herramienta, a la Fuente de vibración y al Sistema de medida de vibraciones, fuerzas de corte y rugosidad superficial. Todo ello se realizó en el Taller de mecanizado del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

3.1 Equipos

3.1.1 Fresadora

El mecanizado a realizar es un fresado combinado con la fresadora marca Jarbe modelo CM-60 de la Figura 3.1 y cuyas características se muestran en la Tabla 3-1.



Figura 3-1. Fresadora CM-60

Tabla 3-1. Características técnicas de la fresadora

Características	
Superficie útil de la mesa	1050 x 240 mm
Movimiento longitudinal automático	780 mm
Movimiento transversal automático	300 mm
Movimiento vertical automático	400 mm
Rango de régimen de giro	50 – 1250 rpm
Velocidades de avance de la mesa	9 – 625 mm/min
Paso de los husillos	5 mm
Mesa con giro a cada lado	45 °
Eje portafresas	Cono ISA 1 3/4
Retrocesos rápidos de los avances longitudinal y vertical	2000 mm/min
Motor de la caja de velocidades	3 HP
Motor de la caja de avances	1,5 HP
Motobomba de refrigeración	0,1 HP

3.1.2 LMS Pimento

Es el equipo encargado de la medición de vibraciones durante el proceso de mecanizado. Consta de un aparato multicanal (Figura 3-2) conectado a una serie de acelerómetros (Figura 3-3) que se instalarán en la máquina y en la fuente de vibración. Las medidas son tratadas en un ordenador mediante el programa “Spectra”, el cual se encarga de ir almacenando los valores en archivos de texto y de ir mostrándolos gráficamente.

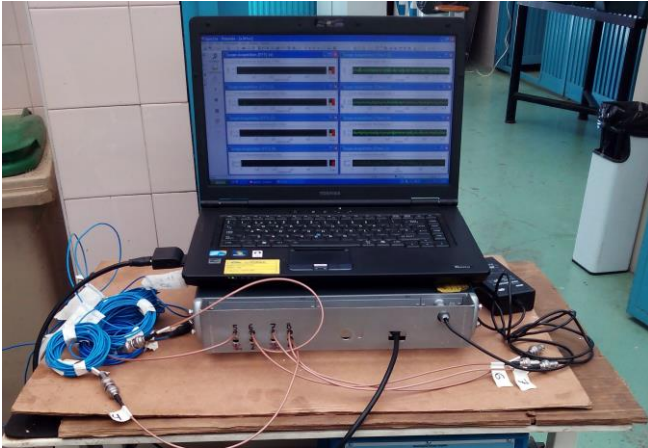


Figura 3-2. Equipo LMS Pimento



Figura 3-3. Acelerómetro PCB Piezotronics 352C33

Tabla 3-2. Características del acelerómetro PCB Piezotronics 352C33

Características	
Sensibilidad	100 mV/g
Rango de frecuencia	0,5 Hz – 10 kHz
Frecuencia de resonancia	≥ 50 kHz

3.1.3 Plato dinamométrico Kistler

Será el encargado de medir las fuerzas durante el proceso de fresado. Es el modelo Kistler 9257B, el cual permite medir con precisión las tres componentes ortogonales de fuerza a través de cuatro sensores piezoeléctricos. Cuenta con una gran rigidez y como consecuencia de ello una alta frecuencia natural. Conectado al plato (Figura 3-4 y Tabla 3-3) se tiene un amplificador multicanal tipo 5070, el cual se encarga de registrar los valores de fuerza de los distintos canales (Figura 3-5).

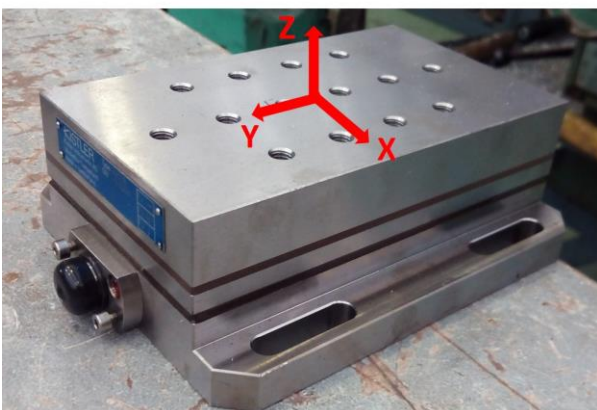


Figura 3-4. Plato Kistler con los tres ejes de medición



Figura 3-5. Amplificador multicanal tipo 5070

Tabla 3-3. Especificaciones técnicas plato Kistler modelo 9257B

Características	
Rango de medición	$\pm 5 \text{ kN}$
Sensibilidad	$F_y \approx -7,5 \text{ pC/N}$
	$F_z \approx -3,5 \text{ pC/N}$
Frecuencia natural	$\approx 3,5 \text{ kHz}$
Rango de temperatura	$0 - 70 \text{ }^\circ\text{C}$
Conexión	Fischer 9-polos neg.
Longitud	170 mm
Ancho	100 mm
Peso	7,3 kg

Los datos registrados por el plato Kistler se tratan a través del programa informático *Labview*. En él se muestran gráficamente los valores de las fuerzas en los ejes X, Y y Z a la vez que se van almacenando en un archivo de texto. A modo de ejemplo se observa en la Figura 3-6 una medición correspondiente a una prueba realizada y tratada mediante *Labview*.



Figura 3-6. Representación de las fuerzas medidas

3.1.4 Durómetro

Para la caracterización del material se utilizará un durómetro modelo M4U-025 del fabricante EMCOTEST automatic (Figura 3-7). Calcula la dureza midiendo la huella producida por el impacto de una bola en el material. Dicho material será aluminio y se realizarán ensayos para determinar el tipo.

Para la determinación de la dureza se aplica una carga de 162,5 kg mediante una bola con un diámetro de 2,5 mm.



Figura 3-7. Durómetro M4U-025

3.1.5 Rugosímetro

Será el encargado de realizar las mediciones de rugosidad de las superficies mecanizadas. Se trata del modelo M1 del fabricante Mahr, el cual consta de un palpador y una unidad de medida. El palpador se desplaza sobre la superficie una determinada longitud y determina los valores y el perfil de rugosidad. En la Figura 3-8 se puede apreciar el rugosímetro y en la Tabla 3-4 se muestran las características técnicas.



Figura 3-8. Rugosímetro Mahr M1

Tabla 3-4. Especificaciones técnicas rugosímetro M1

Características	
Velocidad transversal	0,5 mm/s
Rangos de medición	100 μm - 150 μm
Resolución del perfil	12 nm
Longitudes de corte	0,25 / 0,8 / 2,5 mm
Longitudes transversal según DIN/ISO	1,75 / 5,6 / 17,5 mm
Parámetros	Ra, Rz, Rmax, RPC

3.2 Pieza

El material de la pieza a mecanizar será aluminio, ya que en la mayoría de artículos relativos a este tipo de proceso se utilizan materiales frágiles. Se usará sólo un material ya que este trabajo se centra en comparar entre los dos procesos y no entre distintos materiales. Para determinar qué tipo de aluminio se tiene se realiza el ensayo de dureza. Se obtiene un resultado de 165 HB, por lo que parece que puede tratarse de una aleación de aluminio 7075, cuya dureza suele estar en torno a ese valor [3][4][13]. Pertenece a las aleaciones de la serie 7xxx, las cuales son de aluminio y zinc en mayor proporción. Son ampliamente utilizadas en estructuras de fuselaje de aviones, equipos móviles y piezas sujetas a altas tensiones de trabajo en la industria aeroespacial. La composición de la aleación de aluminio 7075 se muestra en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Composición de la aleación de aluminio 7075

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zn	Otros
0,4 %	0,5 %	1,2 % - 2 %	0,3 %	2,1 % - 2,9 %	0,18 % - 0,28 %	5,1 % - 6,1 %	0,2 %	0,25 %	0,15 %

La pieza contará con cuatro agujeros en los que irán alojados cuatro tornillos para anclar la pieza al plato dinámico Kistler. También tendrá un escalón, de forma que al mecanizar la herramienta mecanice una cara de la pieza y la opuesta esté libre (Figura 3-9).



Figura 3-9. Pieza para realizar los ensayos

3.3 Herramienta

La herramienta será de acero rápido al cobalto de dos filos recomendada para mecanizar aluminio (Figura 3-10). Cuenta con un recubrimiento de TiN y el fabricante es Garant. En lo que respecta al diámetro se utilizará una de 10 mm disponible en el taller. De esta forma se pueden realizar varias pasadas en el ancho de la pieza.



Figura 3-10. Herramienta seleccionada para el fresado

3.4 Parámetros de corte

Para definir los parámetros con los que se realizarán los ensayos se compara entre los valores recomendados por la norma *ISO 8688 Tool life testing in milling Part 2* y los recomendados por el fabricante de la herramienta. Además habrá que tener en cuenta los valores que alcanza la máquina herramienta en cuanto a velocidad de giro y avance se refiere (Figuras 3-11 y 3-12).



Figura 3-11. Velocidades de giro fresadora CM-60



Figura 3-12. Velocidades de avance fresadora CM-60

Según la norma *ISO 8688 Tool life testing in milling Part 2* se recomienda utilizar una velocidad de corte igual a 35 m/min y un avance por diente entre 0,08 mm/diente y 0,125 mm/diente. Por otra parte, el fabricante de la herramienta recomienda para trabajar con este tipo de aluminio (con Si ≤ 6 %) utilizar una velocidad de corte de 70 m/min y una velocidad de avance de 320 mm/min [41].

3.5 Variables experimentales

Teniendo en cuenta todos los valores anteriores, junto con el diámetro de la herramienta y las posibles velocidades de la máquina herramienta se escogen tres velocidades de corte diferentes, correspondientes a las tres velocidades de giro más altas de la fresadora. Para cada velocidad se utilizarán tres velocidades de avance, correspondientes también a las mayores posibles de la fresadora. Estos parámetros, así como la nomenclatura utilizada quedan expuestos en la Tabla 3-6, distinguiendo con las letras “sv” el ensayo sin vibración y con las letras “cv” el ensayo con vibración.

Para el cálculo de la velocidad de corte y del avance se han usado las siguientes ecuaciones:

$$v_c = \pi DN \tag{3.1}$$

$$v_f = f \cdot N \tag{3.2}$$

Tabla 3-6. Parámetros de corte y nomenclatura de cada ensayo

v_c (m/min)	v_f (mm/min)	f (mm/rev)	Código
24,19 (N=770 rpm)	279	0,3623	V1f1sv
			V1f1cv
	416	0,5402	V1f2sv
			V1f2cv
	625	0,811	V1f3sv
			V1f3cv
29,21 (N=930 rpm)	279	0,3	V2f1sv
			V2f1cv
	416	0,4473	V2f2sv
			V2f2cv
	625	0,672	V2f3sv
			V2f3cv
39,26 (N=1250 rpm)	279	0,2232	V3f1sv
			V3f1cv
	416	0,3328	V3f2sv
			V3f2cv
	625	0,5	V3f3sv
			V3f3cv

3.6 Caracterización de la vibración

Como se ha comentado anteriormente, interesa que se pueda desarrollar una vibración de alta frecuencia y baja amplitud. El objetivo es conseguir una vibración y transmitirla a la herramienta. Para ello se valoró como primera opción utilizar un motor girando desequilibrado, lo cual siempre es perjudicial pero en este caso se quería usar esa vibración generada para el mecanizado. Mediante una aproximación del sistema y una simulación de la respuesta en Matlab se comprobó que la amplitud generada es pequeña y la frecuencia resultante en función del giro del motor. Esto planteaba el inconveniente de que no se disponía de un motor que girara a tantas vueltas para generar la frecuencia deseada. Por otro lado, habría que diseñar además otro sistema para colocar el motor junto con la fresadora, lo cual es un problema si se tiene un motor de un tamaño considerable. Por lo tanto, esta idea quedó descartada.

Surgió la posibilidad de utilizar un excitador electrodinámico, el cual está formado por una serie de imanes y vibra alimentado por un generador de frecuencia y un amplificador de potencia para intensificar la señal. La vibración llegaría a la herramienta a través de una varilla de acero. No se pudo usar este sistema debido a la rotura del amplificador y a la imposibilidad de repararlo a tiempo para la realización del proyecto.

Finalmente se ha usado un dispositivo excitador, el cual consta de un pequeño motor que mediante su giro produce una vibración y la transmite a través de una varilla. Mediante un acelerómetro y el analizador de señales *Pimento* se realizó una prueba para determinar su frecuencia de vibración y la amplitud resultante (Figura 3-14). La frecuencia resultó ser de 270,5 Hz (Figura 3-13), inferior a la deseada para los experimentos aunque la amplitud sí parecía adecuada. Por motivos de disponibilidad se eligió este sistema para realizar los ensayos.

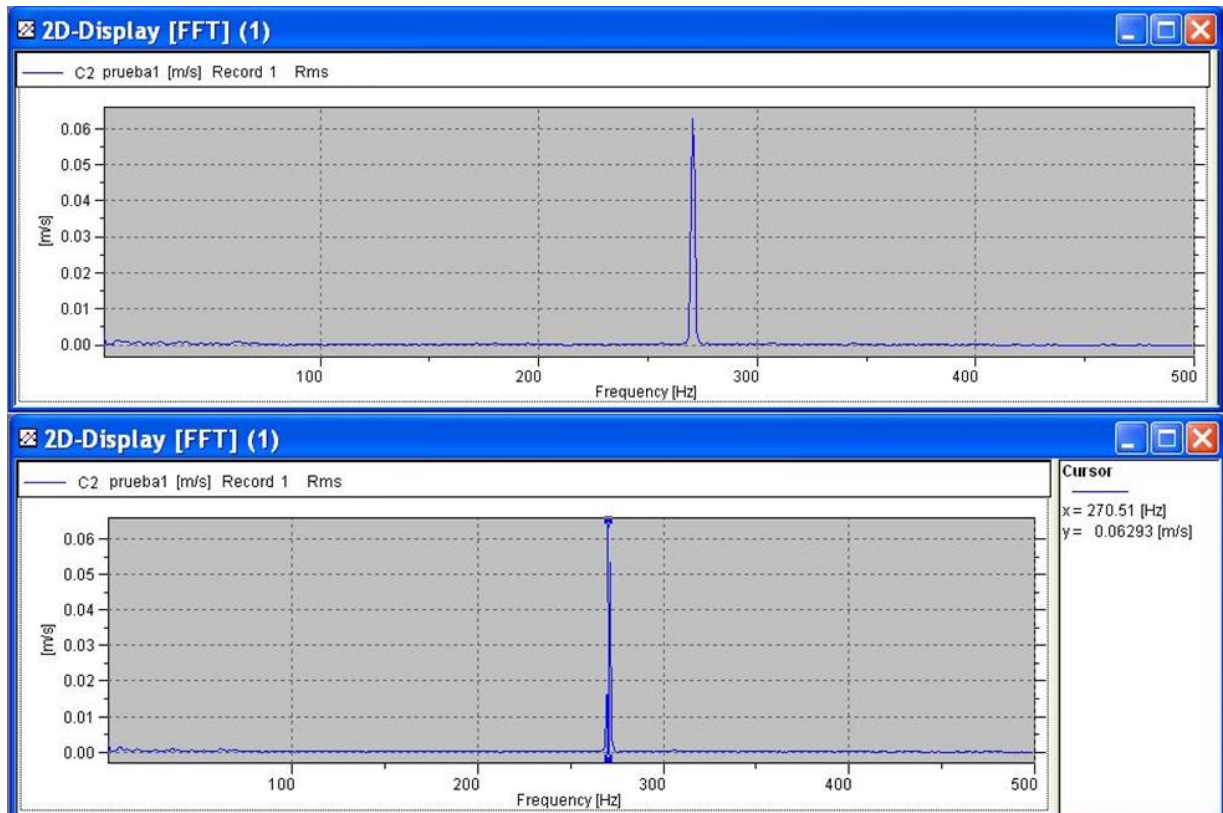


Figura 3-13. Frecuencia del dispositivo excitador



Figura 3-14. Prueba para determinar la frecuencia del excitador

3.7 Ejecución de los ensayos

3.7.1 Preparación

Se parte de una pieza inicial disponible en el taller. Primero se mecaniza la pieza para hacerle los cuatro agujeros donde se alojan los tornillos que sirven de unión entre el plato Kistler y la pieza (Figura 3-15). Posteriormente hay que mecanizar una parte del ancho para realizarle el escalón, mencionado en el apartado 3.2 correspondiente a la pieza (Figura 3-16). El plato y la pieza se montan en la fresadora mediante tornillos directamente a la mesa.



Figura 3-15. Pieza inicial con los cuatro agujeros



Figura 3-16. Mecanizado del escalón

3.7.2 Pruebas experimentales

Para medir las vibraciones durante el mecanizado se colocan cuatro acelerómetros en la fresadora, dispuestos de la siguiente forma: uno en el husillo de giro y el resto en la mesa de la fresadora en dirección longitudinal, en dirección transversal y en dirección vertical (Figuras 3-18 y 3-19). El dispositivo excitador se colocará mediante un soporte anclado a otra máquina rígida del taller, de forma que se pueda colocar en contacto con la herramienta cuando se requiera hacer el ensayo con vibración (Figura 3-17).

Se realizan varias pruebas en vacío, sin mecanizar, para comprobar que el dispositivo excitador transmite la vibración a la herramienta tal y como se pretende. En la Figura 3-20 se muestra una prueba realizada en vacío y tratada mediante el programa *Pimento* en la que el canal correspondiente al husillo muestra la frecuencia aportada por el excitador, correspondiente a una frecuencia de 270,5 Hz.

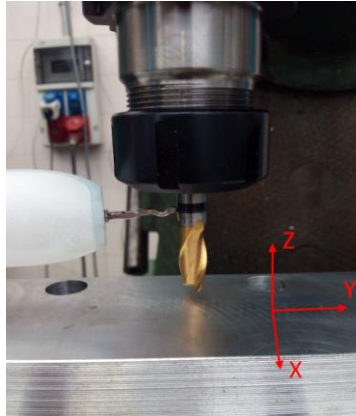


Figura 3-17. Excitador en contacto con la herramienta



Figura 3-18. Acelerómetro ubicado en el husillo



Figura 3-19. Acelerómetros en dirección longitudinal, transversal y vertical

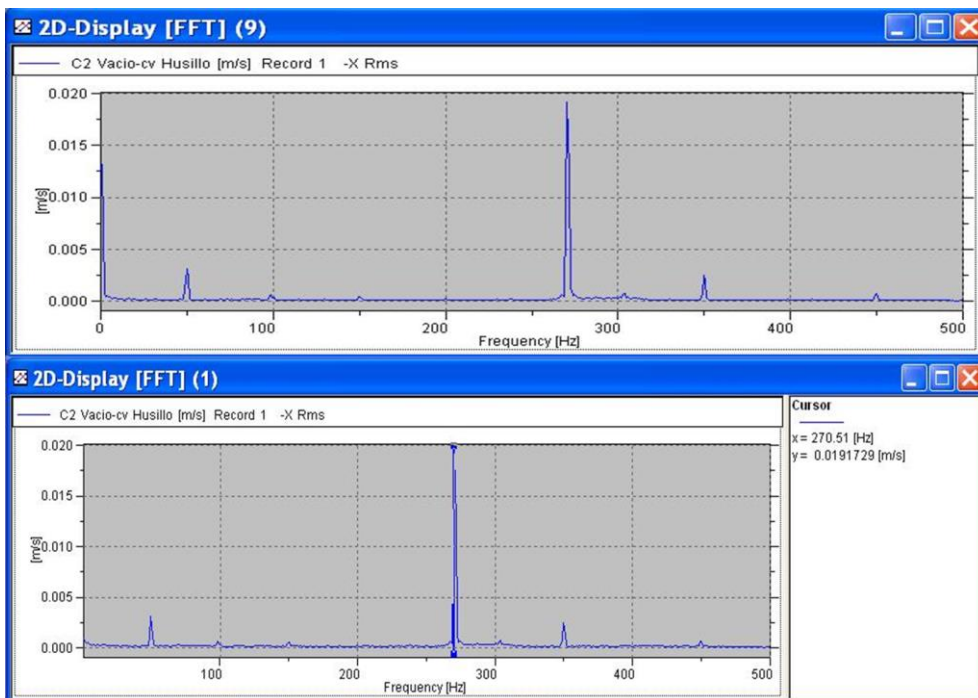


Figura 3-20. Medición en el husillo de una prueba realizada en vacío

Para medir la rugosidad superficial se montará el rugosímetro directamente sobre la mesa de la fresadora (Figura 3-21) de forma que no sea necesario desmontar la pieza, la cual va unida mediante tornillos al plato Kistler, cada vez que se realice una medida de rugosidad. Se realizarán cuatro pasadas en el ancho de la pieza con una profundidad axial de 1 mm y se tomarán las medidas de rugosidad. Los parámetros de corte para los ensayos son los definidos en el apartado 3.4. Para cada caso se realiza el proceso dos veces, uno sin vibración y otro con vibración, por lo tanto son un total de 18 experimentos. Para cada uno se miden las fuerzas en los ejes X, Y y Z y los valores de rugosidad superficial.

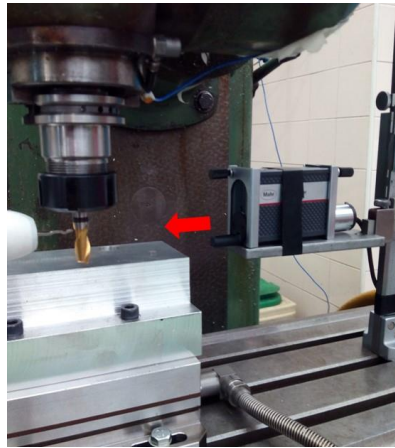


Figura 3-21. Montaje del rugosímetro en la fresadora

Al finalizar los experimentos se observa el estado de la herramienta para comprobar que se encuentra en buen estado y que no tenga un desgaste que haya podido afectar al resultado de los ensayos. Dicha comprobación se realizó con un microscopio óptico y se midió también el diámetro de la herramienta para verificar que seguían siendo 10 mm y no se había producido un desgaste excesivo (Figuras 3-22, 3-23 y 3-24).



Figura 3-22. Microscopio óptico SMZ 800



Figura 3-23. Estado de la herramienta al finalizar los ensayos

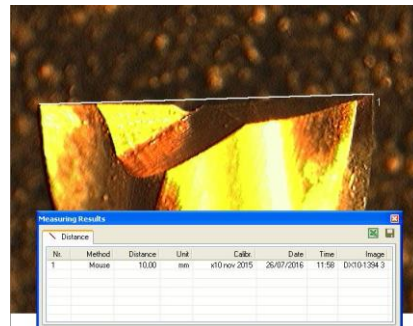


Figura 3-24. Comprobación del diámetro de la herramienta

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizaron un total de 18 ensayos que contemplaban las variables experimentales objeto de estudio. Se procesaron los resultados de cada uno de ellos, los cuales se relacionan a continuación.

4.1 Medición de fuerzas

Con los resultados obtenidos se tiene la evolución de las fuerzas para cada ensayo en función del tiempo de mecanizado. En todos los ensayos realizados se aprecia una evolución de la misma en función del tiempo de mecanizado. Por ello se calcula la media y la fuerza máxima en cada caso con la finalidad de comparar entre los dos procesos y con los valores teóricos. Dichos valores se representan en la Tabla 4-1, donde la fuerza teórica corresponde a la fuerza media en la dirección perpendicular al avance calculada mediante la ecuaciones (2.12) y (2.13) con una constante de corte $k_t = 450 \text{ N/mm}^2$. Las fuerzas se encuentran expresadas en N.

Tabla 4-1. Resultados teóricos y experimentales de fuerzas

Código	v_c	v_f	f	\bar{F}_x teórica	\bar{F}_x	$F_x(\text{máx})$	\bar{F}_y	$F_y(\text{máx})$	\bar{F}_z	$F_z(\text{máx})$
V1f1sv	24,19	279	0,3623	81,53	112,97	137,43	43,48	59,84	69,2	86,64
V1f1cv				81,52	106,2	131,95	37,31	58,57	83	97,89
V1f2sv		416	0,5402	121,55	168,99	192,59	40,52	68,71	52,58	67,85
V1f2cv				121,55	142,17	168,53	68,06	94,79	66,21	84,84
V1f3sv		625	0,811	182,63	194,72	214,02	35,72	49,83	76,72	87,3
V1f3cv				182,63	200,63	220,67	69,34	82,82	87,5	97,75
V2f1sv	29,21	279	0,3	67,5	75,9	90,4	27,61	44,22	46,98	57,37
V2f1cv				67,49	77,41	94,51	27,06	46,71	57,6	69,52
V2f2sv		416	0,4473	100,65	123,84	142,46	38,91	53,93	62,35	74,12
V2f2cv				100,64	126,24	140,56	41,45	61,17	48,66	58,8
V2f3sv		625	0,672	151,21	158,31	173,93	60,86	84,81	29,24	41,73
V2f3cv				151,21	158,3	186,63	63,29	82,63	40,21	54,35
V3f1sv	39,26	279	0,2232	50,22	60,43	76,07	23,11	42,47	36,84	50,04
V3f1cv				50,22	63,28	83,29	24,23	40,15	47,39	59,74
V3f2sv		416	0,3328	74,88	91,02	104,53	41,2	56,89	37,17	46,91
V3f2cv				74,88	90,63	114,32	35,98	52,79	44,91	53,34
V3f3sv		625	0,5	112,5	125,4	144,35	53,31	64,25	36,86	48,87
V3f3cv				112,49	133,01	146,17	54,39	66,37	24,75	36,08

4.1.1 Influencia de la velocidad de avance

En este apartado se muestran gráficamente y se analizan los valores de fuerzas medias y máximas para cada velocidad de corte en función de la velocidad de avance. Las Figuras 4-1, 4-2 y 4-3 representan la fuerza media mientras que las Figuras 4-4, 4-5 y 4-6 representan los valores de fuerza máxima. Con respecto a la fuerza teórica, se observa en la Tabla 4-1 que los valores son prácticamente idénticos para los casos con vibración y sin vibración, por lo tanto en las gráficas se representará sólo uno de ellos.

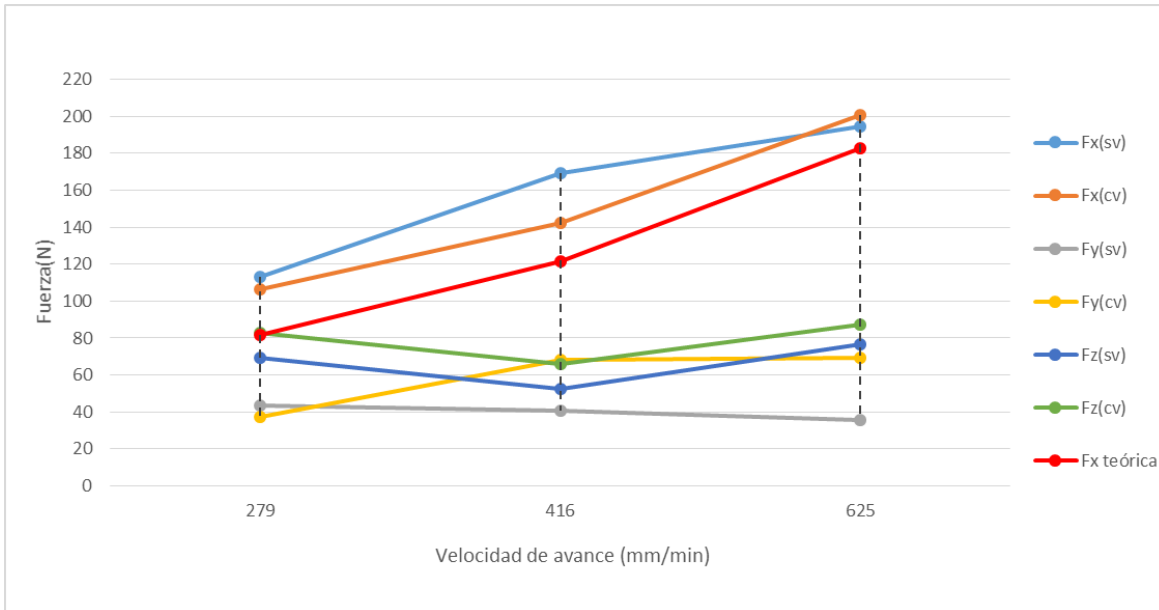


Figura 4-1. Fuerza media para $v_c = 24,19$ m/min

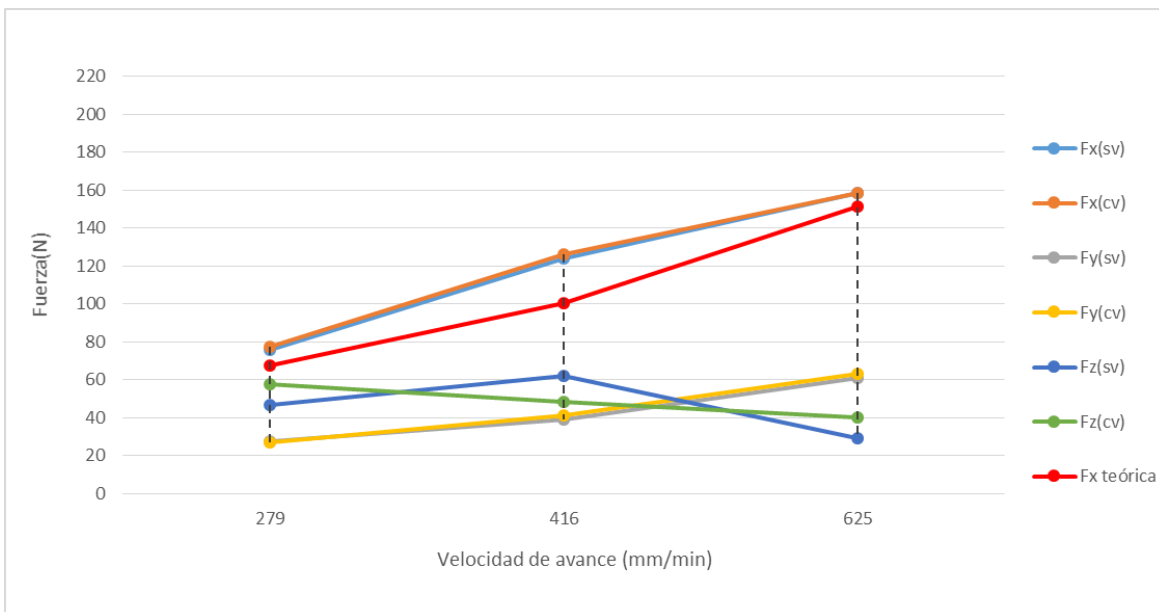


Figura 4-2. Fuerza media para $v_c = 29,21$ m/min

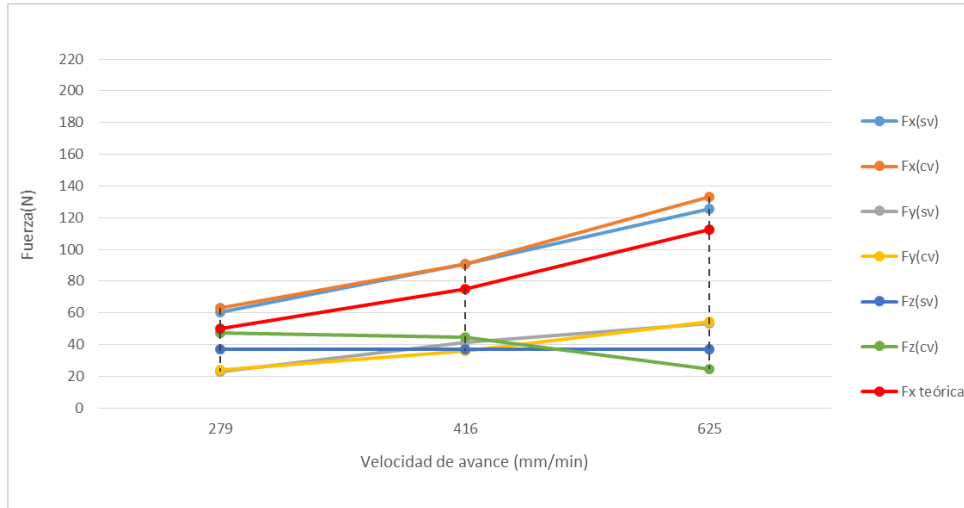


Figura 4-3. Fuerza media para $v_c = 39,26$ m/min

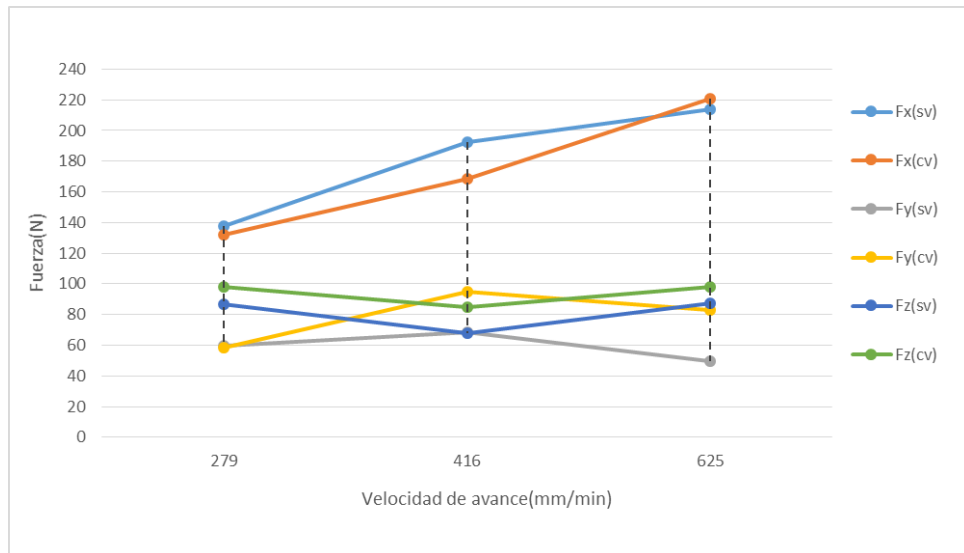


Figura 4-4. Fuerza máxima para $v_c = 24,19$ m/min

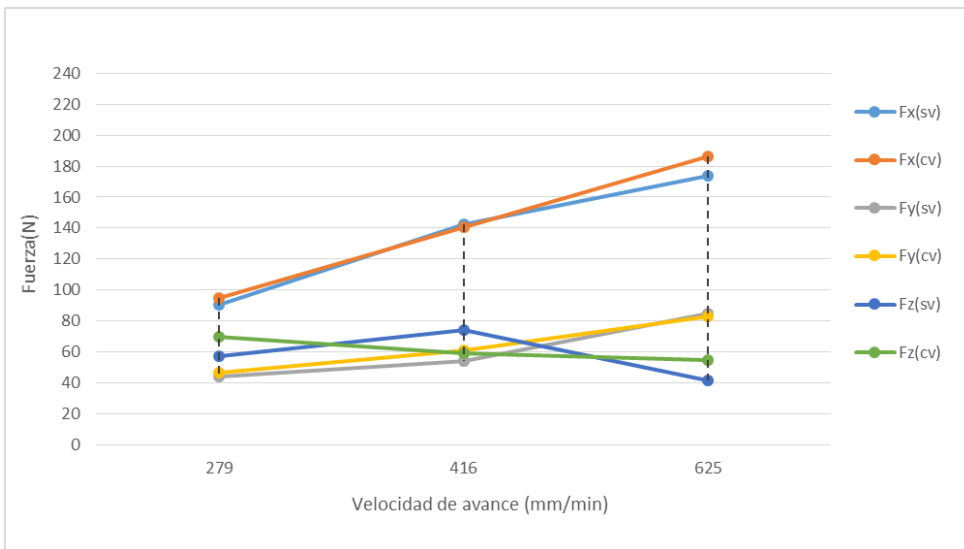


Figura 4-5. Fuerza máxima para $v_c = 29,21$ m/min

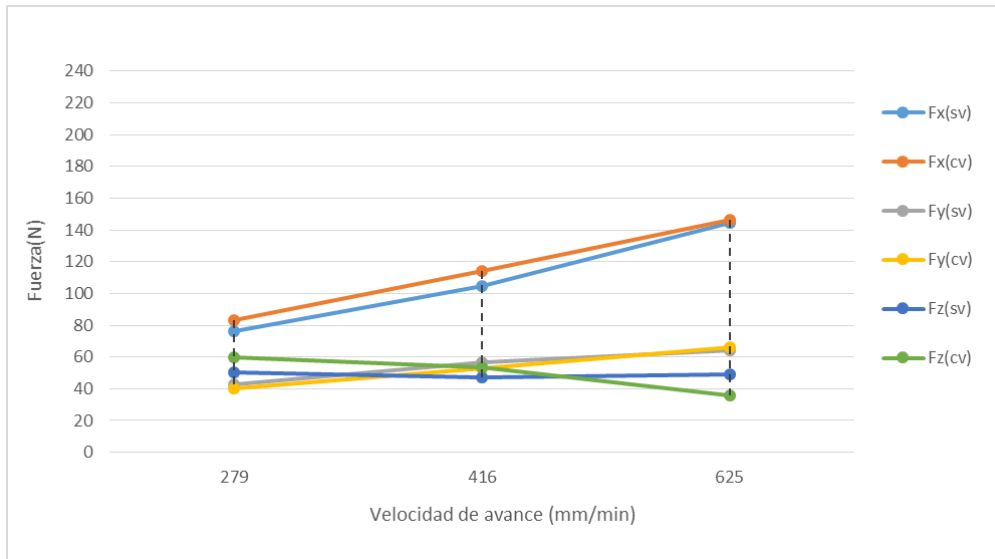


Figura 4-6. Fuerza máxima para $v_c = 39,26 \text{ m/min}$

Cuando se analizan la fuerza media y las fuerza máxima lo primero que se observa es que la mayor fuerza se produce en la dirección x (dirección perpendicular al avance). En cuanto a F_x hay varios aspectos a considerar:

- Para la fuerza media (Figuras 4-1, 4-2 y 4-3), los resultados experimentales de F_x tienen la misma tendencia que los resultados teóricos. Esta tendencia se presenta en todos los casos y se refiere al aumento del valor de la fuerza conforme aumenta el avance. Esto tiene sentido ya que si se observa la relación teórica entre la fuerza y el avance (ecuaciones 2.12 y 2.13) se tiene que son directamente proporcionales.
- Tanto para la fuerza media como para la fuerza máxima se tiene que los mayores valores se producen para velocidades de corte más pequeñas. Siguiendo el razonamiento del punto anterior, en teoría se tiene que conforme disminuye la velocidad N de giro (disminuye por tanto la velocidad de corte) aumenta el valor de la fuerza.
- En lo que se refiere a la comparación entre los casos con vibración y sin vibración se observa que no hay una diferencia apreciable. En general se tiene la misma tendencia y valores parecidos. Sólo en el caso de la velocidad de corte menor trabajando con velocidades de avance más bajas se aprecia una disminución de F_x en el caso con vibración respecto al convencional (Figuras 4-1 y 4-4). Esta mejora puede tener sentido ya que hay investigaciones que han probado la disminución de fuerzas del proceso con vibración y ésta se observa de forma más característica para parámetros de corte menores [1][22][33].

En cuanto a las fuerzas en las otras direcciones, de forma general no se observa que se produzca una disminución de fuerzas en el caso con vibración.

4.1.2 Influencia de la velocidad de corte

En este caso se tienen las fuerzas para cada velocidad de avance empleada y comparadas en función de la velocidad de corte. Las Figuras 4-7, 4-8 y 4-9 representan la fuerza media mientras que las Figuras 4-10, 4-11 y 4-12 representan los valores de fuerza máxima.

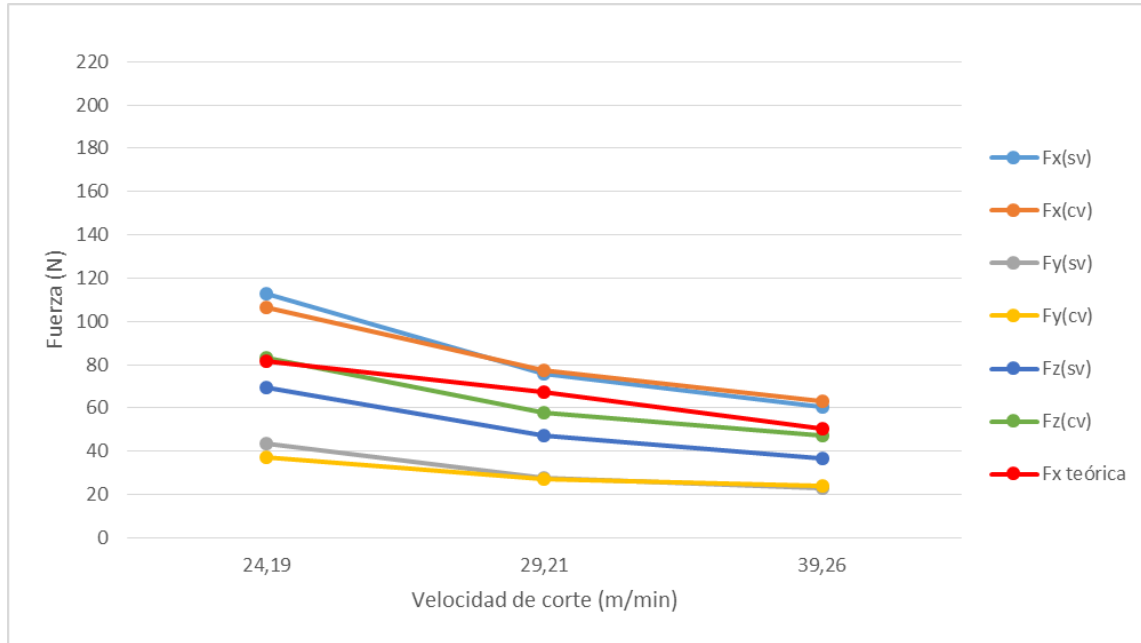


Figura 4-7. Fuerza media para $v_f = 279$ mm/min

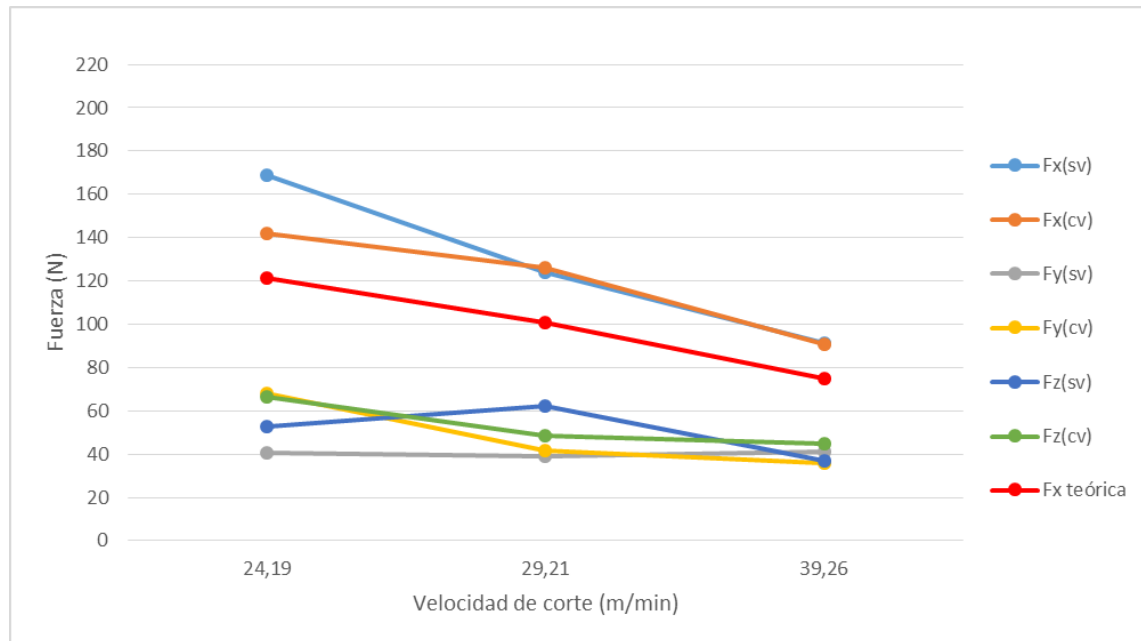


Figura 4-8. Fuerza media para $v_f = 416$ mm/min

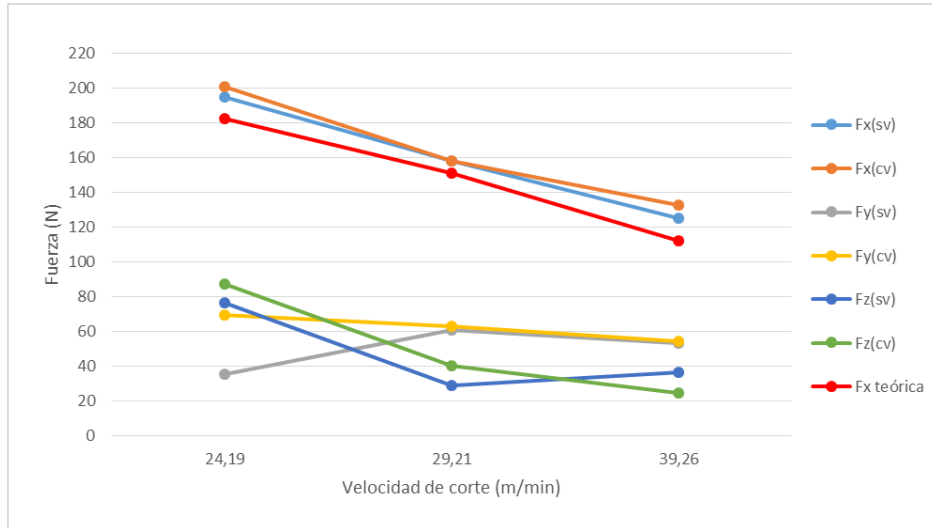


Figura 4-9. Fuerza media para $v_f = 625$ mm/min

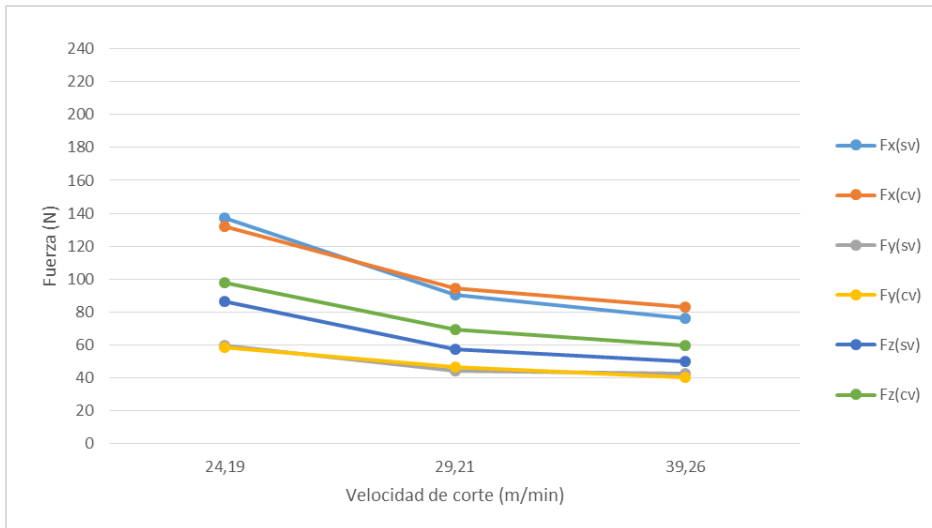


Figura 4-10. Fuerza máxima para $v_f = 279$ mm/min

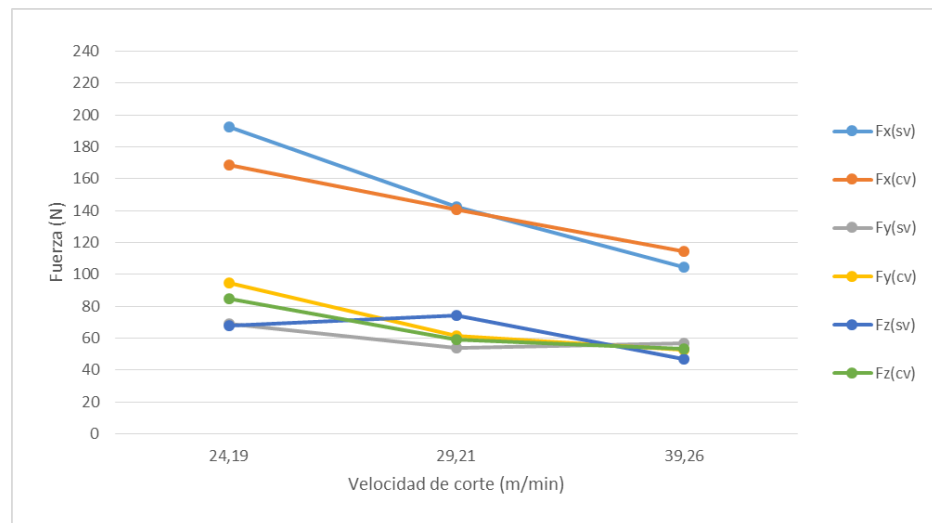


Figura 4-11. Fuerza máxima para $v_f = 416$ mm/min

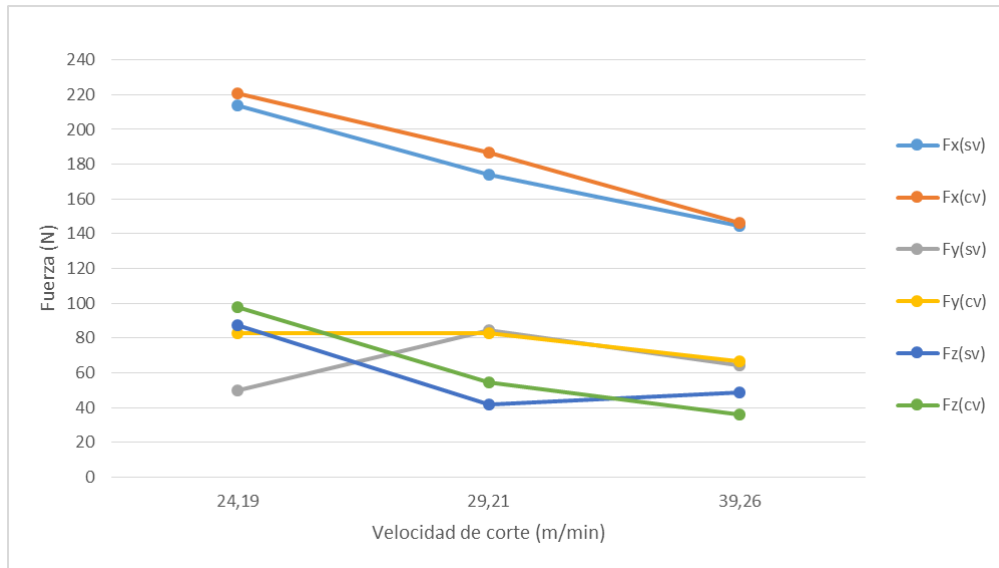


Figura 4-12. Fuerza máxima para $v_f = 625 \text{ mm/min}$

Un análisis similar al del apartado anterior se puede hacer a partir de la Figura 4-7 a la 4-12. Se observa igualmente que la fuerza de corte que más destaca es la fuerza en la dirección del eje x. Respecto a esta fuerza F_x :

- Los resultados experimentales muestran el mismo comportamiento que los teóricos. Como ya se comentó en el apartado anterior, se tienen valores de fuerza menores conforme aumenta la velocidad de corte.
- En lo que se refiere al avance, se producen fuerzas mayores conforme aumenta la velocidad de avance. Esto es debido a la relación teórica existente entre la fuerza y la velocidad de avance, la cual hace que al aumentar uno aumente el otro también.
- En cuanto a la comparación entre los dos procesos se tiene la misma idea que en el apartado anterior. En general no hay diferencia característica entre ellos, excepto para la velocidad de corte más pequeña trabajando a velocidades de avance bajas (Figuras 4-7, 4-8, 4-10 y 4-11), en la que sí se aprecia una disminución de la fuerza en el caso con vibración.

Se observa también en las gráficas que para la velocidad de corte más baja trabajando a la velocidad de avance más elevada (Figuras 4-9 y 4-12), la F_y aumenta en el caso con vibración, lo cual empeora el proceso.

4.2 Medición de rugosidad superficial

Para cada ensayo se ha medido un valor de R_a . Los resultados teóricos y experimentales de rugosidad superficial se muestran en la Tabla 4-2, en la que se expresa también el porcentaje de aumento (en rojo) o disminución (en verde) del proceso con vibración respecto al proceso sin vibración. Para el cálculo de la rugosidad teórica se ha utilizado la ecuación (4.1) desarrollada por Knight y Boothroyd (2005) [20], donde f corresponde al valor del avance y D al diámetro de la herramienta.

$$R_a = \frac{0,0642}{D} \times f^2 \quad (4.1)$$

Tabla 4-2. Resultados de R_a teóricos y experimentales

Código	V_c	V_f	f	R_a teórica	R_a experimental	
V1f1sv	24,19	279	0,3623	0,8429	4,774	10,32 % ↓
V1f1cv					4,281	
V1f2sv		416	0,5402	1,8739	7,368	0,76 % ↑
V1f2cv					7,425	
V1f3sv		625	0,811	4,2297	10,28	6,17 % ↓
V1f3cv					9,645	
V2f1sv	29,21	279	0,3	0,5778	3,592	6,4 % ↑
V2f1cv					3,822	
V2f2sv		416	0,4473	1,2846	5,626	5,28 % ↑
V2f2cv					5,923	
V2f3sv		625	0,672	2,8995	7,704	1,89 % ↓
V2f3cv					7,558	
V3f1sv	39,26	279	0,2232	0,3198	3,345	1,37 % ↓
V3f1cv					3,299	
V3f2sv		416	0,3328	0,7111	4,595	4,98 % ↓
V3f2cv					4,366	
V3f3sv		625	0,5	1,605	6,842	5,74 % ↓
V3f3cv					6,449	

4.2.1 Influencia del avance

En este apartado se representan gráficamente los valores de rugosidad superficial, tanto teóricos como experimentales, en función de los valores de avance empleados (Figura 4-13).

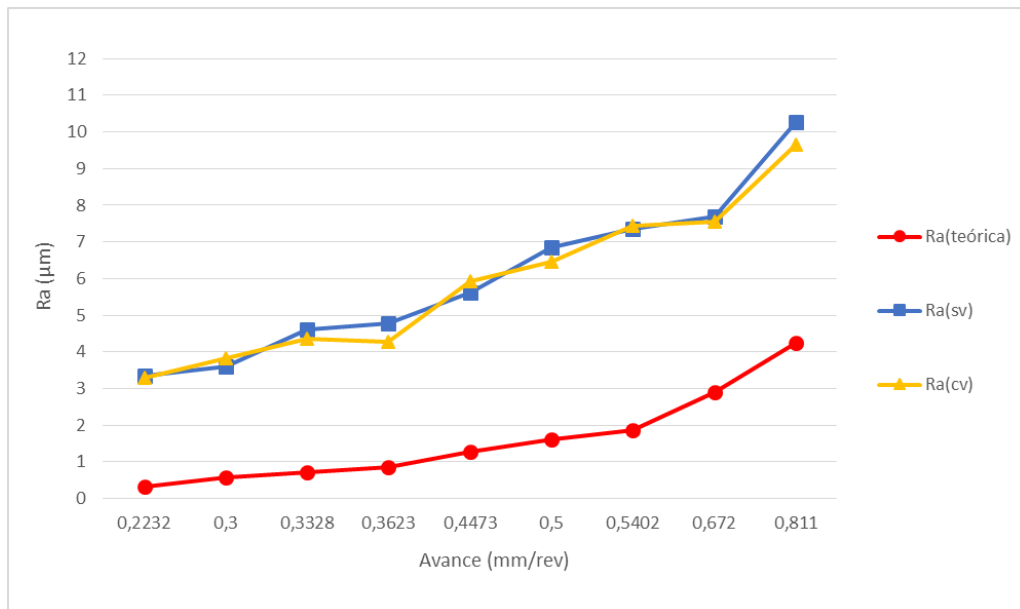


Figura 4-13. Valores de Ra en función del avance

De la Figura 4-13 se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Los resultados experimentales, tanto para el caso sin vibración como para el caso con vibración, tienen el mismo comportamiento que se da en los resultados teóricos. Ambos experimentan un aumento de la rugosidad al aumentar el valor del avance. Esto es debido a que el valor de Ra es proporcional al avance, tal y como se muestra en la ecuación (4.1).
- Si se compara el proceso con vibración y sin vibración, se observa que el proceso con vibración mejora el valor de Ra en algunos de los ensayos realizados. Sólo en tres puntos se tiene que el valor de Ra del caso con vibración es mayor que el convencional. Esto se da para unos valores de $f = 0,3$ mm/rev, $f = 0,4473$ mm/rev y $f = 0,5402$ mm/rev como se puede observar en la Figura 4-13.

4.2.2 Influencia de la velocidad de corte

Para este caso se muestran los resultados obtenidos de rugosidad para cada velocidad de avance empleada, variando la velocidad de corte en cada caso (Figuras 4-14, 4-15 y 4-16).

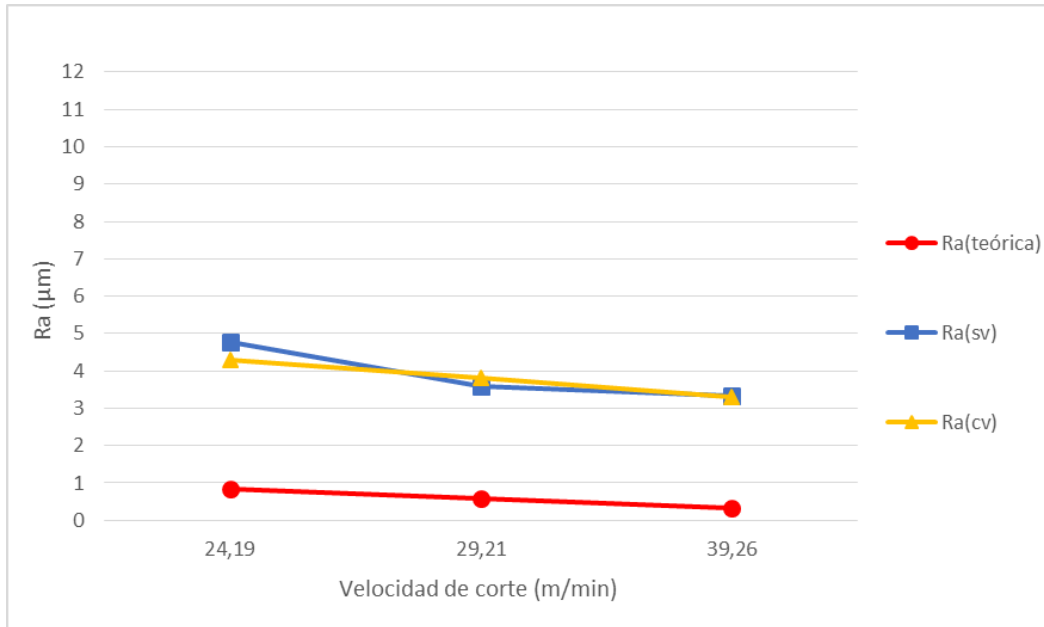


Figura 4-14. Valores de Ra para $v_f = 279$ mm/min en función de v_c

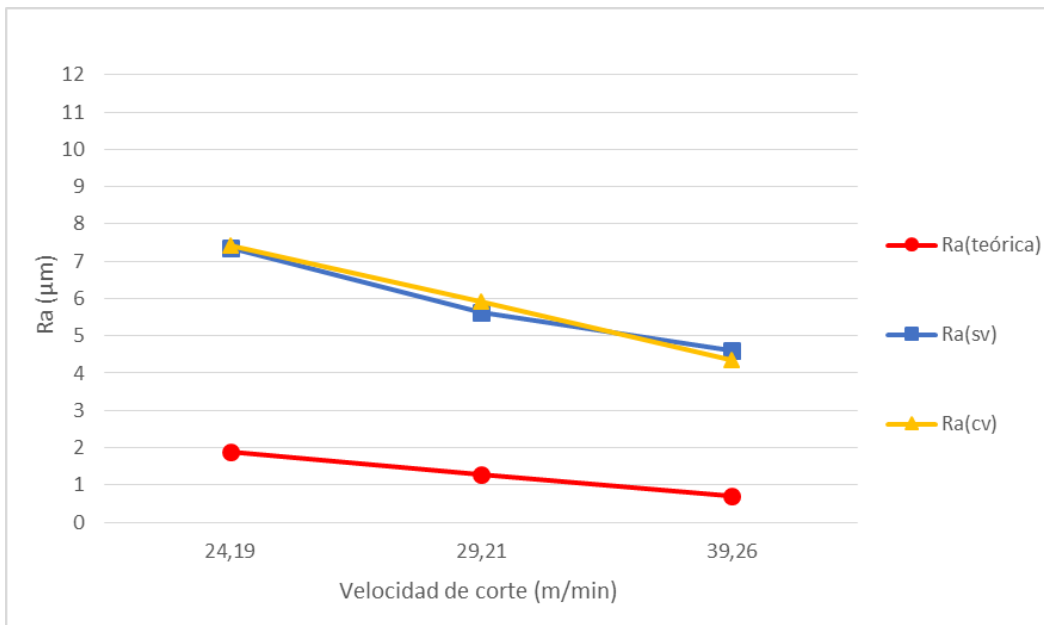


Figura 4-15. Valores de Ra para $v_f = 416$ mm/min en función de v_c

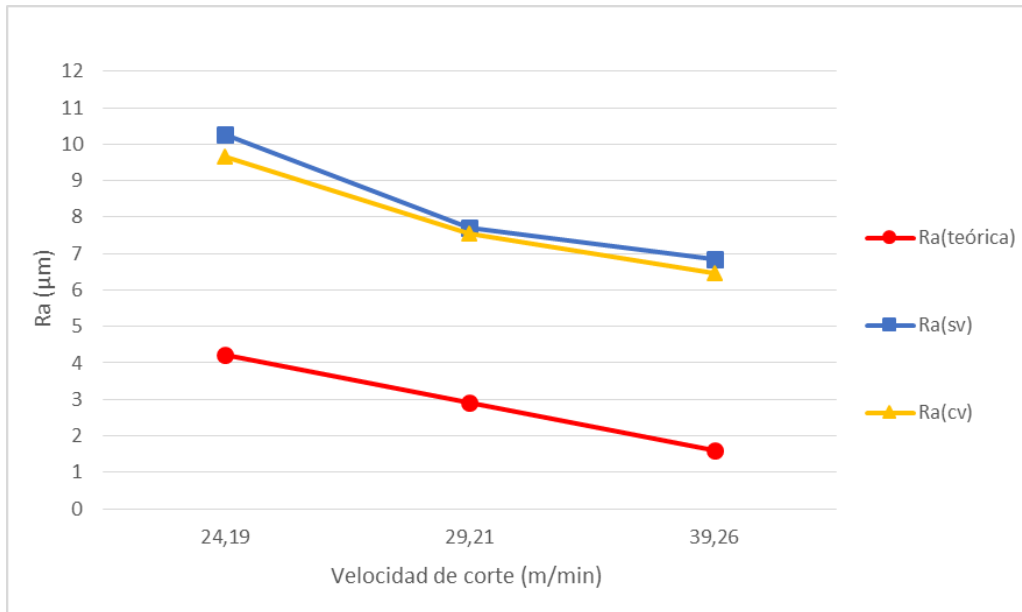


Figura 4-16. Valores de Ra para $v_f = 625$ mm/min en función de v_c

Si se analizan los valores de Ra en función de las velocidades de corte, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Se observa la misma tendencia en los resultados teóricos y experimentales con respecto a la velocidad de avance. Cuando ésta aumenta, aumentan los valores de Ra, por lo que se dan los mayores valores para $v_f = 625$ mm/min (Figura 4-16).
- Si se compara la variación con la velocidad de corte, se muestran unos valores de Ra menores conforme aumenta ésta. Dicha variación con la velocidad de corte es más significativa para la velocidad de avance más elevada, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-3. Variación de Ra entre la velocidad de corte mayor y menor

v_f (mm/min)		Ra(µm)		Variación (µm)
		$V_c = 24,19$ m/min	$V_c = 39,26$ m/min	
279	sv	4,774	3,345	1,429
	cv	4,281	3,299	0,982
416	sv	7,368	4,595	2,773
	cv	7,425	4,366	3,059
625	sv	10,28	6,842	3,438
	cv	9,645	6,449	3,196

- En lo que se refiere al proceso con vibración se observa en general una disminución en los valores de Ra con respecto al proceso sin vibración. Esta disminución parece que resulta más significativa para la velocidad de avance más elevada, ya que en ese caso se produce una mejora para las tres velocidades de corte empleadas, con una disminución mayor trabajando con la velocidad de corte menor (Figura 4-16).

4.3 Medición de vibraciones

Como ya se comentó en el apartado 3.6.2, se utilizan cuatro acelerómetros para medir las vibraciones durante el proceso. Los cuatro canales corresponden al husillo y a las direcciones longitudinal, transversal y vertical de la mesa de la fresadora. Hubo un error de medición con el canal correspondiente a la dirección vertical, por lo que los resultados no salieron correctamente. Esto se muestra gráficamente en la Figura 4-17, donde se aprecia el error resultante debido al ruido.

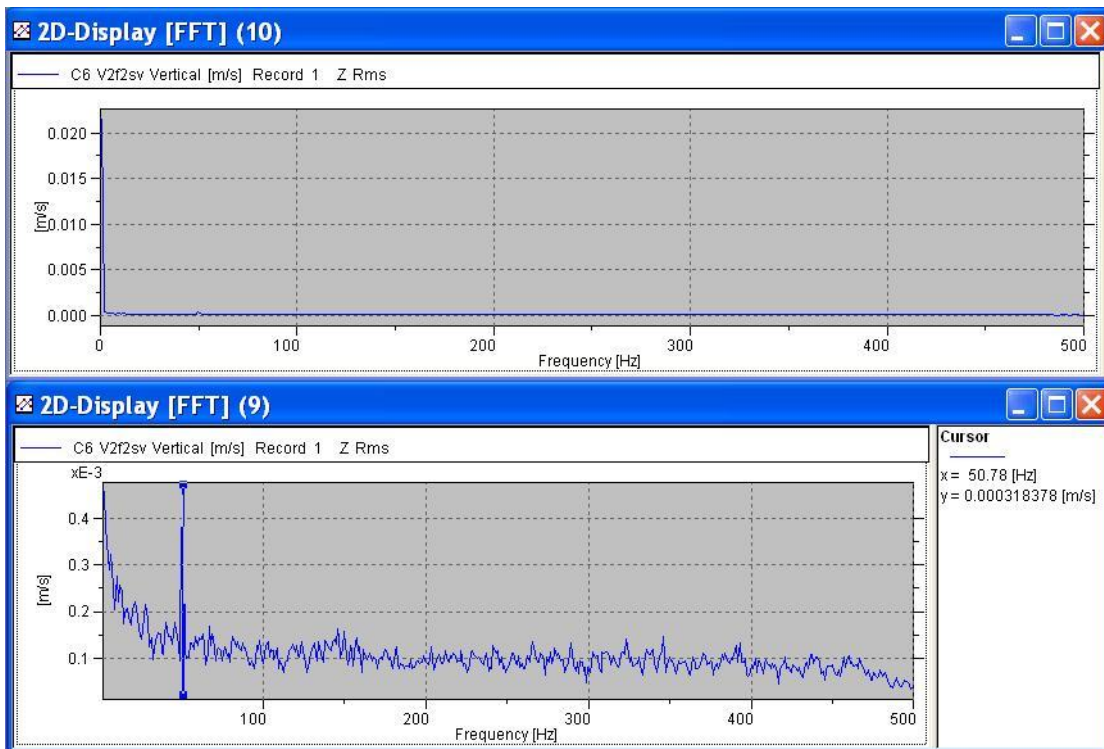


Figura 4-17. Ejemplo de error de medición en la dirección vertical

Analizando los resultados en las otras direcciones y en el husillo no se aprecia la frecuencia aportada por el excitador, ya que a la hora de mecanizar intervienen otras frecuencias de mayor amplitud propias de la máquina herramienta.

En general no se observa diferencia entre los dos procesos, con vibración y sin vibración. Como ejemplo se muestra en las Figuras 4-18, 4-19 y 4-20 las frecuencias resultantes para la velocidad de corte intermedia y velocidad de avance más pequeña ($v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min).

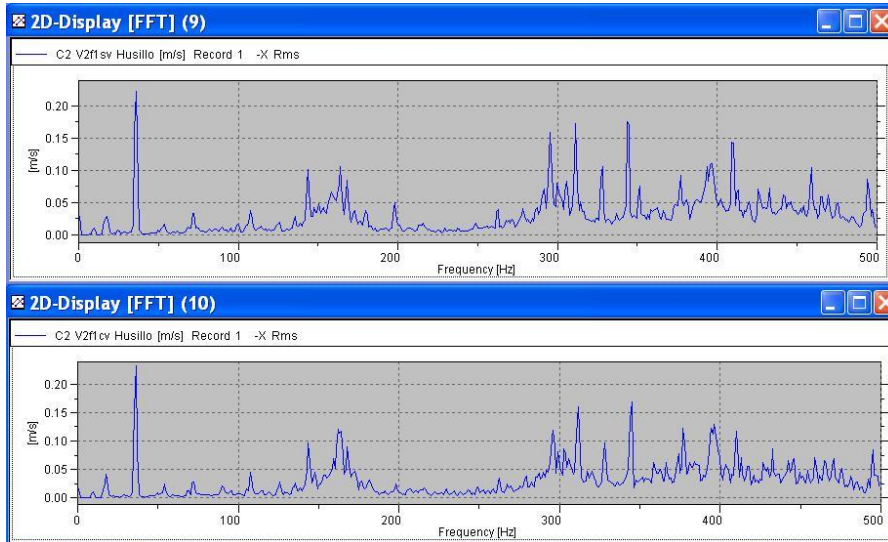


Figura 4-18. Frecuencias en el husillo para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

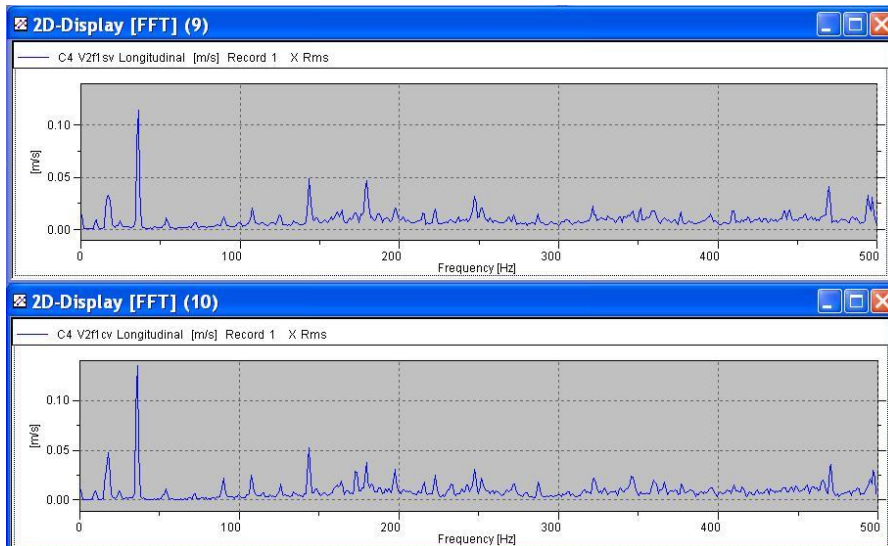


Figura 4-19. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

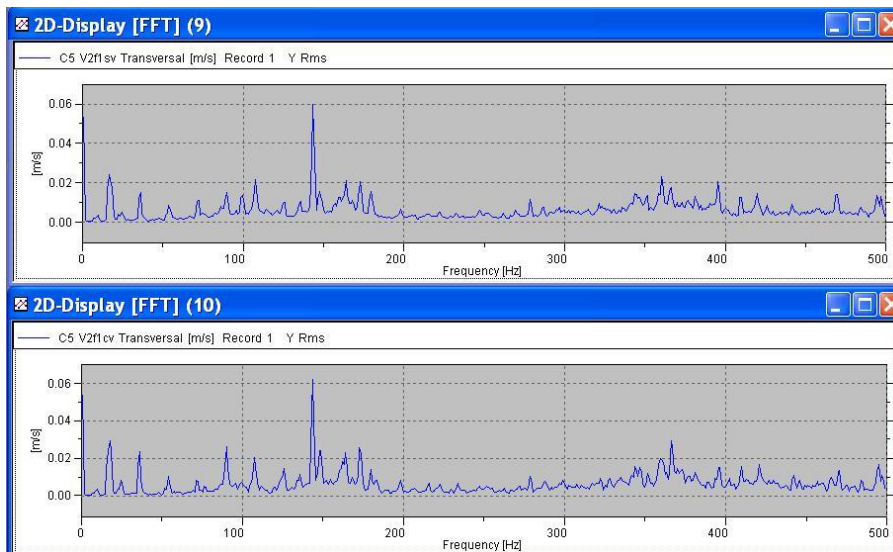


Figura 4-20. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

Para el caso de la velocidad de corte menor con la velocidad de avance intermedia ($v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 416$ mm/min) sí se observaba una diferencia apreciable entre los dos procesos (Figuras 4-21 a 4-23). En el caso sin vibración se tenían amplitudes más elevadas y se producían una serie de armónicos a una frecuencia de 20,34 Hz (Figura 4-24).

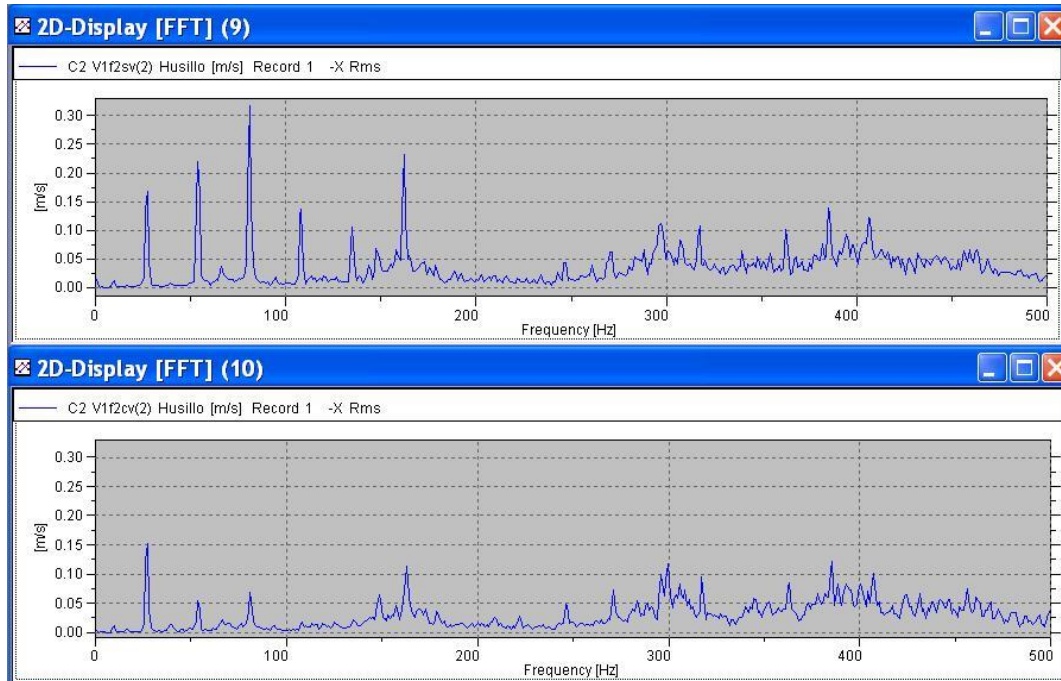


Figura 4-21. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min

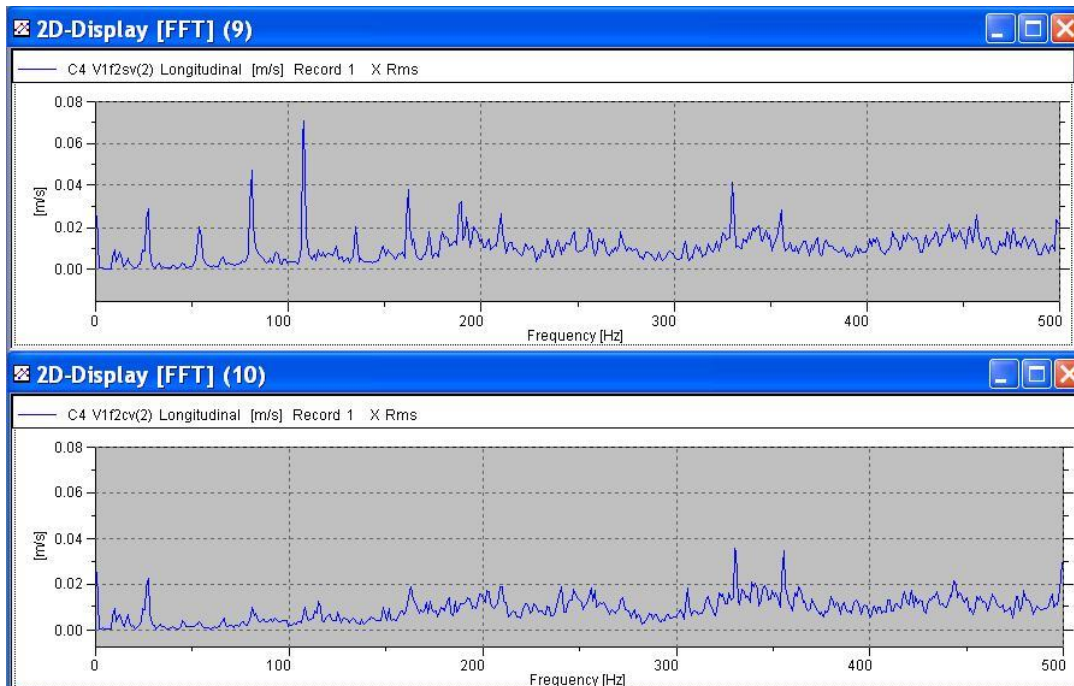


Figura 4-22. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min

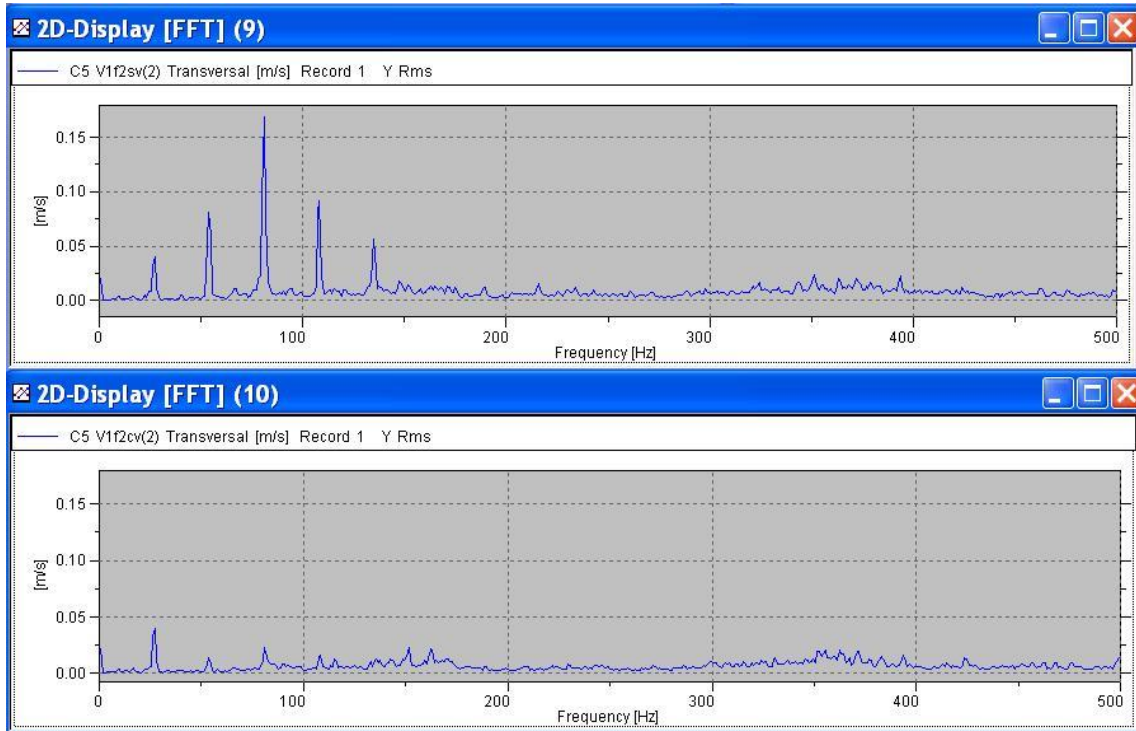


Figura 4-23. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min

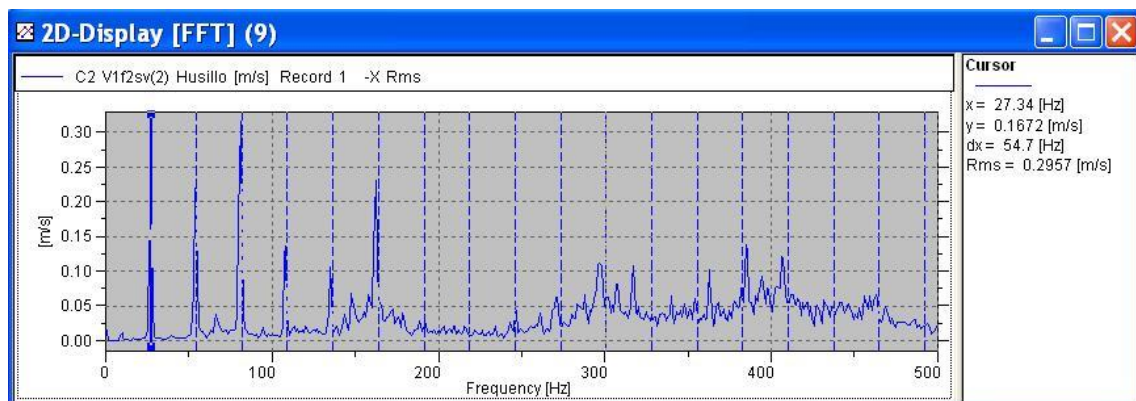


Figura 4-24. Serie de armónicos producidos con $v_c=24,19$ m/min y $v_f=416$ mm/min

5 CONCLUSIONES

A partir del análisis de resultados se pueden destacar varias conclusiones para los ensayos de fresado combinado realizados:

- En las pruebas realizadas en vacío se verifica la presencia de la frecuencia excitadora en la herramienta (270,5 Hz). Durante el mecanizado, dicha frecuencia no se observa ya que las amplitudes de las vibraciones que produce la máquina herramienta durante la realización de los ensayos es mayor.
- La presencia de vibración durante el mecanizado no produce efectos de mejora. De forma general, no disminuyen las fuerzas de corte y no hay una tendencia clara en lo que sucede con la rugosidad superficial.
- Las fuerzas de corte son mayores en la dirección perpendicular al avance y aumentan para valores de velocidad de avance más elevados y velocidades de corte más pequeñas, tal y como muestran las relaciones teóricas. Este comportamiento se mantiene cuando el proceso se asiste con vibraciones y para F_x se produce una mejora para unos determinados parámetros de corte (velocidad de corte menor y velocidades de avance bajas).
- Los valores de R_a muestran un comportamiento similar al teórico (aumentan con la velocidad de avance manteniendo la velocidad de corte y disminuyen al aumentar la velocidad de corte manteniendo la velocidad de avance) tanto en el proceso convencional como en el asistido por vibraciones. No obstante, en general se aprecia una disminución de los valores de R_a cuando se asiste el fresado con la vibración.
- El fresado asistido por vibraciones puede mejorar el proceso para unas ciertas condiciones pero en general no produce una mejora significativa con respecto al proceso de fresado sin vibración.
- Se ha demostrado la influencia que tiene la vibración en parámetros como la fuerza de corte y la calidad superficial pero no en la medida en que se habían expuesto en trabajos anteriores [1][21]. Esto puede deberse a que se trabajó con una frecuencia excitadora bastante por debajo de la que se empleaban en estos estudios.

6 TRABAJOS FUTUROS

A partir de los ensayos y experimentos realizados en este trabajo se pueden proponer como trabajos futuros las siguientes cuestiones:

- Utilizar otro sistema de vibración para poder desarrollar una frecuencia mayor, más parecida a la utilizada en investigaciones y artículos relativos a este tema [29][1][21][14].
- Utilizar un sistema de vibración que permita además variar la frecuencia y la amplitud para estudiar cómo afectarían dichas variaciones a los resultados [25][12].
- Realizar los ensayos con más de un material para analizar y determinar cuál es más favorable para realizar el proceso con vibración bajo unas condiciones de corte determinadas.
- Desarrollar un análisis previo a los experimentos para intentar predecir la tendencia en los resultados para las condiciones de corte que se vayan a utilizar, por ejemplo un estudio con elementos finitos [26][27].

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abootorabi Zarchi, M., Razfar, M., & Abdullah, A. (2012). Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1-4), 83-89.
- [2] Ahn, J., Lim, H., & Son, S. (1999). Improvement of micromachining accuracy by 2 dimensional vibration cutting. *Proc ASPE*, 20, 150-153.
- [3] Alcupla,. Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio (1st ed.). Recuperado de http://www.alcupla.com/uploads/familia/22_21_composicion.pdf
- [4] Aluminio 7075. (2013). Aluminiosmetalesunicornio.com.mx. Recuperado de <http://www.aluminiosmetalesunicornio.com.mx/7075.html>
- [5] Arcona, C. (1996). Tool force, chip formation and surface finish in diamond turning (*PhD dissertation*). North Carolina State University.
- [6] Babitsky, V., Kalashnikov, A., & Molodtsov, F. (2004). Autoresonant control of ultrasonically assisted cutting. *Mechatronics*, 14(1), 91-114.
- [7] Brehl, D. & Dow, T. (2007). Vibration assisted machining technology. *ASPE Proceedings*, 40.
- [8] Brehl, D. & Dow, T. (2008). Review of vibration-assisted machining. *Precision Engineering*, 32(3), 153-172.
- [9] Brehl, D., Dow, T., Garrard, K., & Sohn, A. (1999). Micro-structure fabrication using elliptical vibration-assisted machining. *ASPE Proceedings*, 39, 511-515.
- [10] Brocato, B., Dow, T., & Sohn, A. (2005). *Micro-machining using elliptical vibration assisted machining*(Doctoral dissertation, MS thesis). North Carolina State University.
- [11] Cerniway, M. (2002). Elliptical diamond milling: kinematics, force and tool wear (MS thesis). *North Carolina State University*.
- [12] Chern, G. & Chang, Y. (2006). Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 46(6), 659-666.
- [13] Cortes, J. Aluminio 7075 (1st ed.). Recuperado de <http://www.delmetal.com.ar/productos/aluminio/7075.pdf>
- [14] Elhami, S., Razfar, M., & Farahnakian, M. (2015). Analytical, numerical and experimental study of cutting force during thermally enhanced ultrasonic assisted milling of hardened AISI 4140. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 103, 158-171.
- [15] Gao, G., Zhao, B., Jiao, F., & Liu, C. (2002). Research on the influence of the cutting conditions on the surface microstructure of ultra-thin wall parts in ultrasonic vibration cutting. *Journal Of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 66-70.
- [16] Han, L., Xu, W., & Tso, S. (1998). Ultrasonically Assisted and Piezoelectric Actuators Integrated Cutting Tool. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37(Part 1, No. 8), 4616-4619.
- [17] Japitana, F., Morishige, K., & Takeuchi, Y. (2005). Highly efficient manufacture of groove with sharp corner on adjoining surfaces by 6-axis control ultrasonic vibration cutting. *Precision Engineering*, 29(4), 431-439.
- [18] Kim, J. & Choi, I. (1997). Micro surface phenomenon of ductile cutting in the ultrasonic vibration cutting of optical plastics. *Journal Of Materials Processing Technology*, 68(1), 89-98.

- [19] Klocke, F. & Rubenach, O. (2000). Ultrasonic-assisted diamond turning of glass and steel. *Industrial Diamond Review*, 60, 229-239.
- [20] Knight, W. A., & Boothroyd, G. (2005). Fundamentals of metal machining and machine tools. (3^a ed.) CRC Press.
- [21] Lian, H., Guo, Z., Huang, Z., Tang, Y., & Song, J. (2013). Experimental Research of Al6061 on Ultrasonic Vibration Assisted Micro-Milling. *Procedia CIRP*, 6, 561-564.
- [22] Liu, C., Zhao, B., Gao, G., & Jiao, F. (2002). Research on the characteristics of the cutting force in the vibration cutting of a particle-reinforced metal matrix composites SiCp/Al. *Journal Of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 196-199.
- [23] Ma, C., Shamoto, E., & Moriwaki, T. (2004). Study on the Thrust Cutting Force in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *Materials Science Forum*, 471-472, 396-400.
- [24] Ma, C., Shamoto, E., Moriwaki, T., Zhang, Y., & Wang, L. (2005). Suppression of burrs in turning with ultrasonic elliptical vibration cutting. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 45(11), 1295-1300.
- [25] Maurotto, A. & Wickramarachchi, C. (2016). Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study. *Ultrasonics*, 65, 113-120.
- [26] Mitrofanov, A., Babitsky, V., & Silberschmidt, V. (2003). Finite element simulations of ultrasonically assisted turning. *Computational Materials Science*, 28(3-4), 645-653.
- [27] Mitrofanov, A., Babitsky, V., & Silberschmidt, V. (2004). Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of Inconel 718. *Journal Of Materials Processing Technology*, 153-154, 233-239.
- [28] Moriwaki, T. & Shamoto, E. (1991). Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 40(1), 559-562.
- [29] Moriwaki, T. & Shamoto, E. (1995). Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44(1), 31-34.
- [30] Moriwaki, T., Shamoto, E., & Inoue, K. (1992). Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 41(1), 141-144.
- [31] Negishi, N. (2003). Elliptical vibration assisted machining with single crystal diamond tools (MS thesis). North Carolina State University.
- [32] Overcash, J. & Cuttino, J. (2003). Development of a tunable ultrasonic vibration-assisted diamond turning instrument. *ASPE Proceedings 2003 Annual Meeting*, 503-506.
- [33] Patil, S., Joshi, S., Tewari, A., & Joshi, S. (2014). Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. *Ultrasonics*, 54(2), 694-705.
- [34] Rubenach, O. (2003). From process innovation to product innovation: ultrasonic-assisted diamond turning of optical glass. *Industrial Diamond Review*, (4), 40-49.
- [35] Shamoto, E. (2005). Ultraprecision micromachining of hardened die steel by applying elliptical vibration cutting. *JSME News*, 16, 1-4.
- [36] Shamoto, E. & Moriwaki, T. (1999). Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 48(1), 441-444.
- [37] Shamoto, E., Suzuki, N., Moriwaki, T., & Naoi, Y. (2002). Development of Ultrasonic Elliptical Vibration Controller for Elliptical Vibration Cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51(1), 327-330.
- [38] Shamoto, E., Suzuki, N., Tsuchiya, E., Hori, Y., Inagaki, H., & Yoshino, K. (2005). Development of 3 DOF Ultrasonic Vibration Tool for Elliptical Vibration Cutting of Sculptured Surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1), 321-324.

- [39] Suzuki, N., Masuda, S., Haritani, M., & Shamoto, E. (2004). Ultraprecision micromachining of brittle materials by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. *Micro-Nanomechatronics And Human Science, 2004 And The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics For Information-Based Society, 2004. Proceedings Of The 2004 International Symposium On*, 133-138.
- [40] Suzuki, N., Nakamura, A., Shamoto, E., Harada, K., Matsuo, M., & Osada, M. (2003). Ultraprecision micromachining of hardened steel by applying ultrasonic elliptical vibration cutting. *IEEE Int Sym Micromechatronics Human Science*, 221-226.
- [41] UNCETA.(2000). Catálogo de herramientas. 929-930
- [42] Weber, H., Herberger, J., & Pilz, R. (1984). Turning of Machinable Glass Ceramics with an Ultrasonically Vibrated Tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 33(1), 85-87.
- [43] Xiao, M., Karube, S., Soutome, T., & Sato, K. (2002). Analysis of chatter suppression in vibration cutting. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 42(15), 1677-1685.
- [44] Xu, W. & Zhang, L. (2014). Effect of Frequency and Amplitude on the Performance of Elliptic Vibration-Assisted Cutting of Fibre-Reinforced Polymer Composites. *AMR*, 1017, 753-757.
- [45] Zhou, M., Eow, Y., Ngoi, B., & Lim, E. (2003). Vibration-Assisted Precision Machining of Steel with PCD Tools. *Materials And Manufacturing Processes*, 18(5), 825-834.

ANEXO. RESULTADOS EXPERIMENTALES

1) $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 279$ mm/min

Tabla A-1. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 279$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	79,666954	-48,395718	-74,130653	104,780914	-47,460052	-84,334763
2	103,986115	-30,876688	-61,223324	114,950394	-47,159851	-91,179489
3	115,372559	-33,750626	-68,02285	99,374847	-28,071167	-82,740936
4	88,857658	-47,507397	-86,642593	126,655052	-30,733223	-74,512794
5	84,011559	-43,349571	-68,924026	112,194611	-49,688843	-92,023827
6	125,178917	-40,33424	-59,106342	86,448776	-36,541374	-97,894943
7	110,525154	-48,538845	-75,837036	99,466507	-21,111719	-76,165878
8	99,57679	-38,656582	-75,103493	131,94635	-33,894314	-76,673203
9	112,717079	-33,770054	-59,163059	105,870712	-46,882317	-92,857803
10	122,03009	-38,760101	-72,833382	102,594688	-45,497074	-82,354431
11	96,114487	-46,375824	-84,795624	123,863647	-37,885811	-68,607796
12	110,056084	-48,153587	-59,812778	122,418373	-30,80855	-86,124931
13	137,427902	-43,600903	-56,615795	89,695221	-40,036579	-97,07798
14	115,933128	-38,937202	-76,840714	96,825897	-43,360989	-82,379776
15	85,569923	-47,043541	-75,790916	117,313942	-26,005373	-74,578773
16	112,260452	-43,96841	-60,847324	108,650551	-27,865416	-88,561401
17	124,643883	-35,59549	-69,023575	98,040451	-53,882874	-83,472481
18	105,878288	-53,038212	-73,43103	108,271118	-43,337875	-78,059326
19	101,291901	-56,269882	-62,628872	106,530724	-19,93716	-82,454048
20	128,074127	-33,804768	-56,653137	102,212898	-34,469315	-89,618454
21	113,22908	-30,80295	-73,98439	97,086494	-53,080811	-85,090759
22	93,638847	-44,940239	-75,655403	108,56382	-30,756804	-80,126511
23	107,980904	-51,542488	-60,536091	118,720604	-34,406334	-79,941597
24	128,745483	-28,281431	-62,747982	115,207123	-58,574661	-83,277473
25	112,125961	-50,612564	-73,018936	104,935059	-44,641159	-87,576462
26	111,232597	-59,836411	-65,705307	105,803627	-17,465219	-79,046257
27	127,801636	-33,152813	-63,373112	119,021919	-35,370106	-82,050148
28	118,194687	-21,987755	-75,206398	104,927742	-50,05378	-91,348907
29	110,229507	-57,534885	-75,994804	99,726738	-36,727276	-82,55854
30	114,806114	-53,581745	-62,940029	128,252869	-33,963657	-66,954216
31	131,78064	-24,327063	-63,604351	127,232445	-55,255436	-84,660912
32	129,467529	-36,96225	-69,372917	96,645485	-45,40966	-92,786057
33	115,897003	-57,57021	-70,586441	102,7649	-33,337452	-74,344841
34	114,930725	-28,899792	-68,815018	125,20578	-25,737373	-77,588181
35	128,211426	-12,23555	-71,1502	110,39521	-39,350777	-93,489479
36	116,210724	-53,67474	-72,299438	91,561836	-39,045204	-86,041962

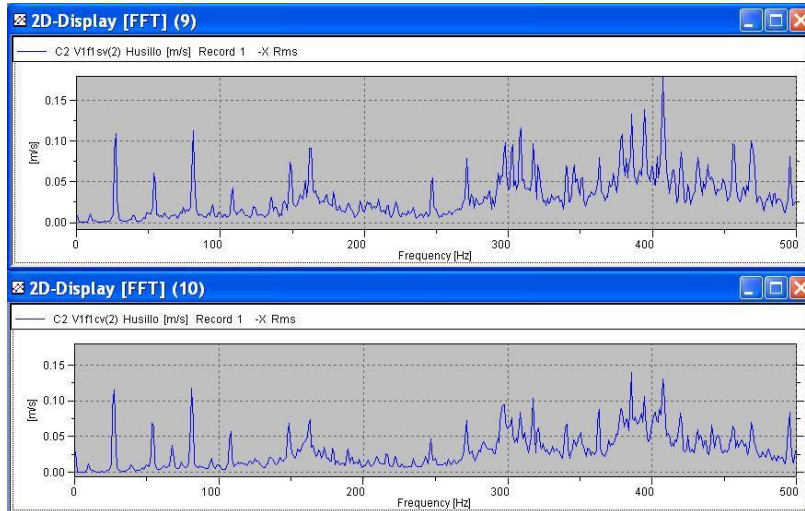


Figura A-1. Frecuencias en el husillo para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min

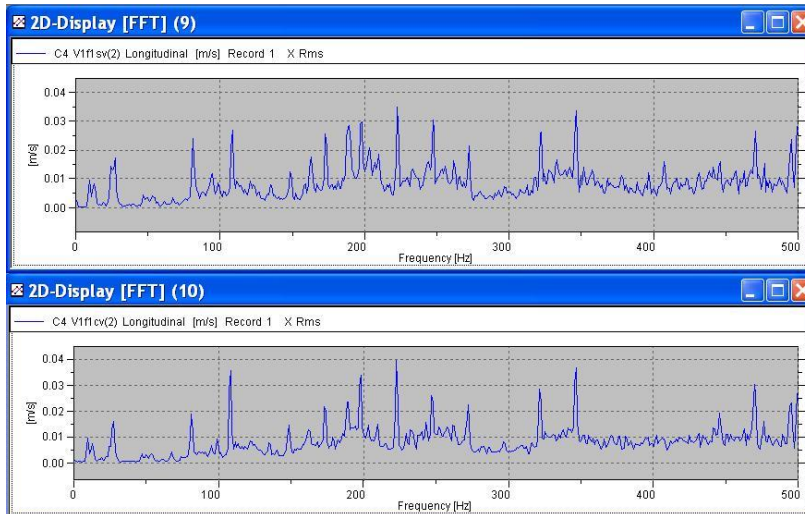


Figura A-2. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min

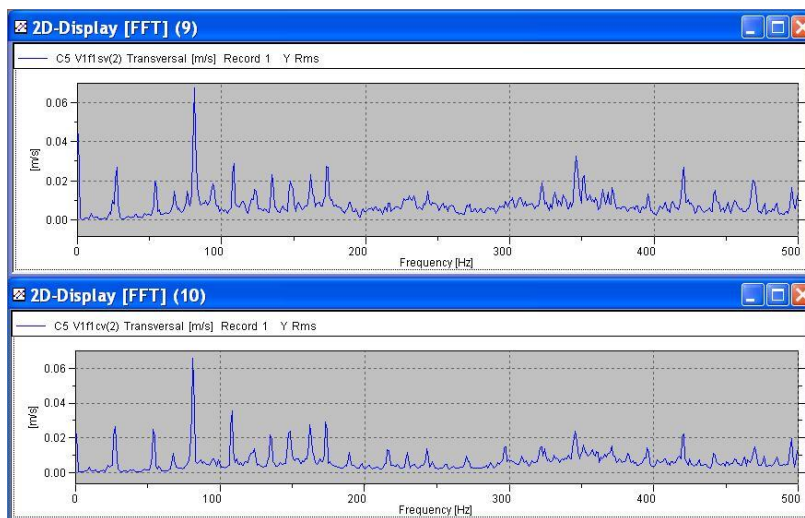


Figura A-3. Frecuencias en dirección transversal para $v_c=24,19$ m/min y $v_f=279$ mm/min

2) $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 416$ mm/min

Tabla A-2. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 416$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	152,18457	-68,715439	-52,737747	137,398056	-75,553146	-75,892059
2	161,94693	-57,276012	-52,428917	137,439056	-78,465469	-65,042145
3	182,436142	-21,790222	-53,269562	159,886642	-56,397194	-64,454193
4	167,794434	-40,672279	-60,09399	134,229462	-63,886276	-75,191704
5	173,052292	-55,499172	-48,72044	134,531891	-78,360016	-66,761154
6	184,831955	-38,659096	-42,196442	153,424408	-59,882172	-59,721615
7	170,107101	-33,509655	-60,208393	145,819305	-60,482929	-73,869308
8	149,082794	-46,851376	-61,041798	134,700165	-83,514107	-66,69664
9	180,700089	-38,076767	-38,70232	145,983978	-67,625946	-55,449715
10	191,936996	-50,585022	-53,657177	158,844971	-58,311859	-66,566086
11	156,713913	-43,592041	-67,852379	125,732742	-67,802391	-84,842941
12	160,983063	-36,769844	-45,399487	132,988724	-72,936874	-55,405369
13	192,592056	-40,361572	-47,529694	167,8461	-66,756187	-55,483978
14	160,741791	-58,732529	-63,950993	139,658752	-76,246162	-76,383644
15	164,632553	-33,887947	-50,855396	130,571793	-68,309311	-65,859344
16	184,367264	-29,726528	-42,565704	152,736069	-62,918461	-55,371086
17	172,032089	-53,966263	-61,62793	155,970474	-72,222763	-72,673691
18	163,638275	-37,213882	-55,932156	125,699944	-79,490456	-73,810577
19	173,70163	-20,709368	-50,63237	144,693512	-62,314762	-52,758575
20	183,369995	-64,056839	-54,296944	168,536789	-71,589508	-62,551643
21	167,892273	-51,347046	-51,729111	130,869476	-72,121941	-76,964325
22	175,25119	-22,568251	-49,874195	136,499115	-56,68906	-60,419247
23	165,902695	-40,172592	-59,627918	159,962036	-65,003731	-55,988766
24	164,731567	-59,922562	-50,317154	151,143402	-94,797638	-71,313919

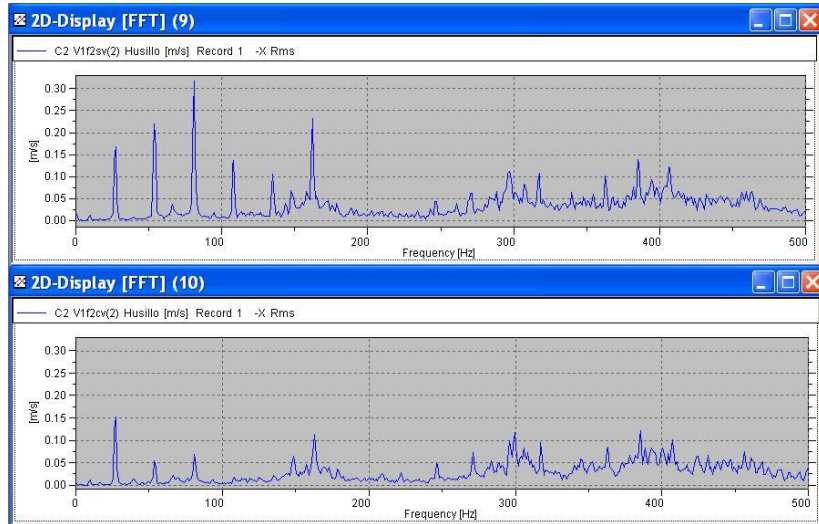


Figura A-4. Frecuencias en el husillo para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

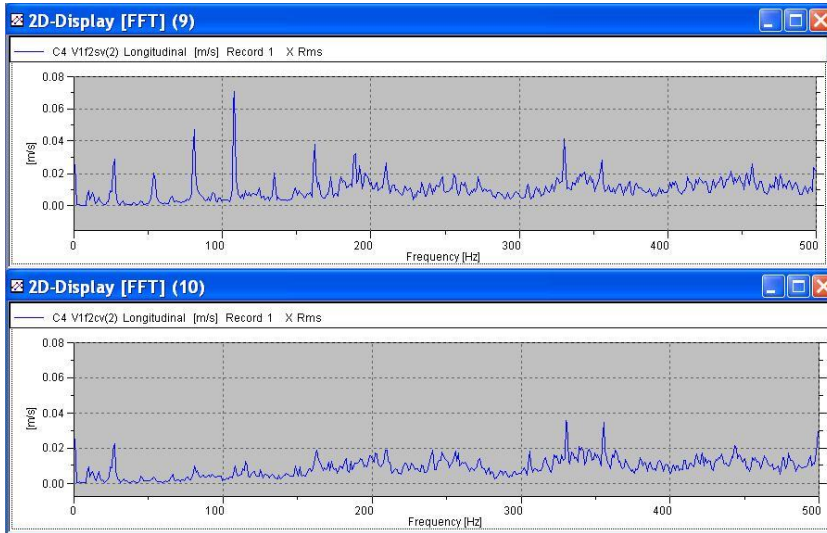


Figura A-5. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

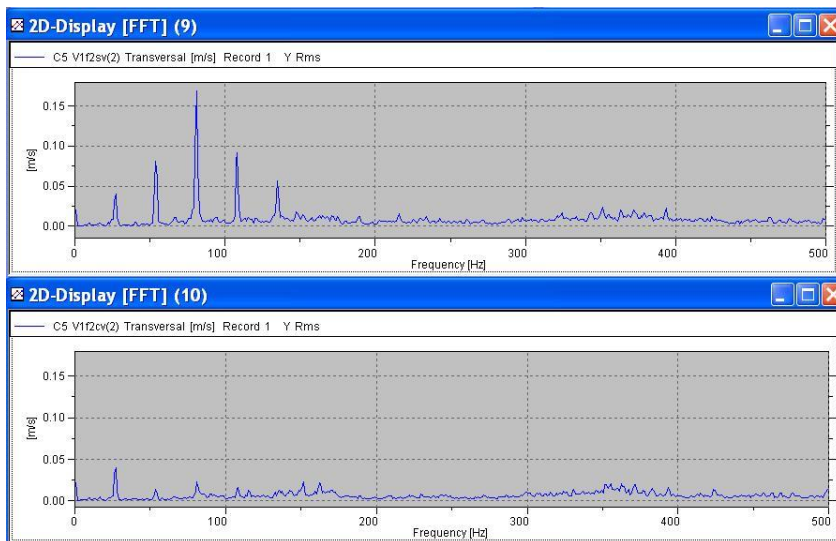


Figura A-6. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

3) $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 625$ mm/minTabla A-3. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 24,19$ m/min y $V_f = 625$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	204,716965	-22,131504	-65,962234	218,83844	-79,226883	-87,344055
2	202,588455	-19,791155	-78,589928	205,143875	-67,442551	-86,6073
3	195,608337	-38,767933	-75,668343	220,672028	-67,508766	-78,413872
4	194,656357	-43,446667	-87,304276	207,687744	-66,273888	-88,850754
5	186,076416	-49,832413	-82,186409	196,06813	-67,637978	-87,656319
6	192,221039	-48,717182	-77,778549	195,962219	-80,07502	-97,753357
7	191,173508	-24,970524	-73,289581	172,633255	-71,043327	-97,53727
8	208,559677	-36,117176	-65,126465	199,405716	-80,906769	-89,087875
9	205,000168	-12,018849	-71,391579	178,557495	-62,510311	-89,953003
10	214,018448	-30,282333	-67,140862	201,851501	-82,819305	-77,306206
11	206,003723	-29,043312	-83,258148	187,99205	-41,347034	-80,607819
12	180,525925	-35,315643	-82,47654	206,290237	-67,251572	-76,05024
13	188,843262	-46,237232	-86,008881	197,836456	-48,742111	-87,2808
14	180,057159	-38,071957	-79,926071	216,050568	-76,613708	-83,747337
15	194,773972	-43,234608	-73,699829	213,829712	-81,323349	-96,93718
16	185,845505	-16,013288	-74,085983	191,184692	-81,765717	-94,688965

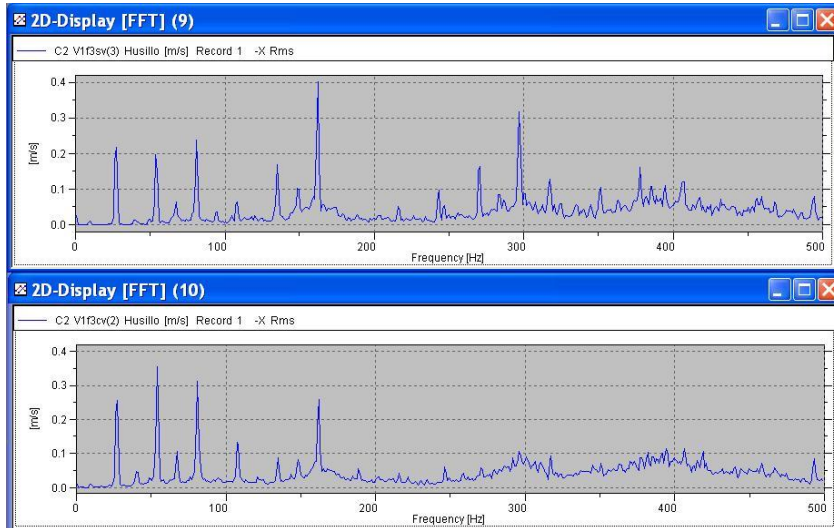


Figura A-7. Frecuencias en el husillo para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

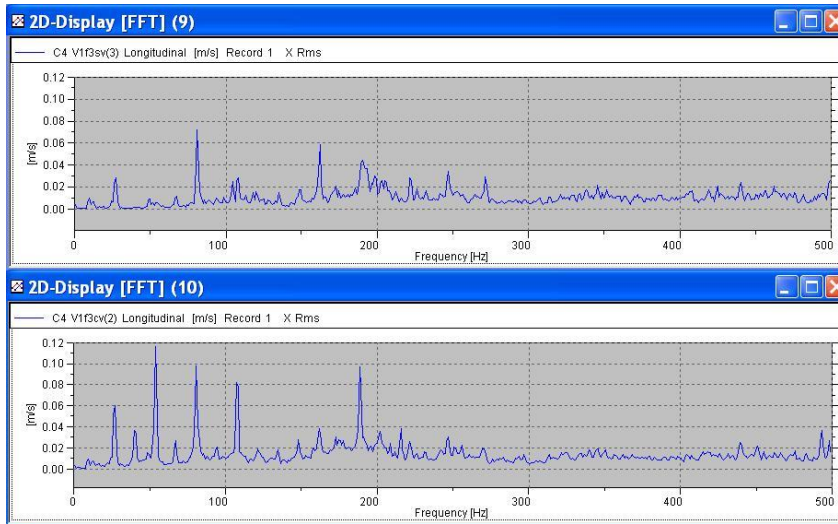


Figura A-8. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

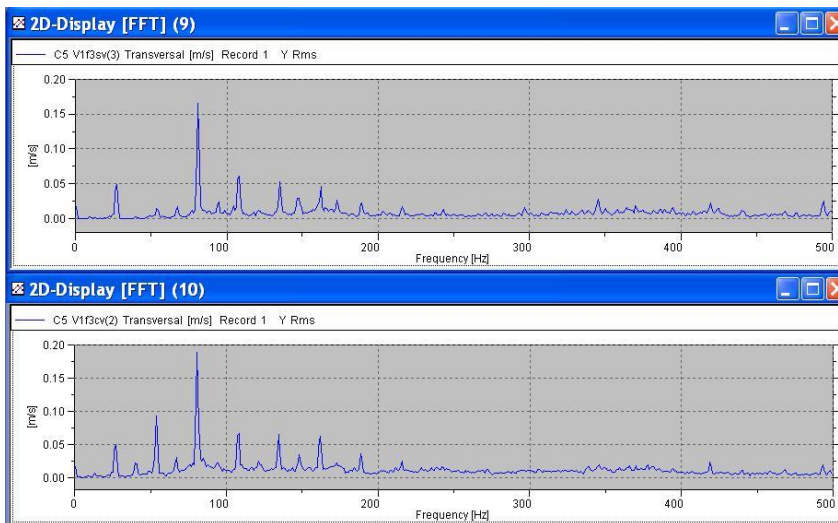


Figura A-9. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 24,19$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

4) $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 279$ mm/min

Tabla A-4. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 279$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	85,031441	-25,509787	-53,475941	73,198166	-42,973206	-62,369678
2	85,273636	-23,307554	-40,365643	77,125778	-22,858313	-68,231422
3	74,534325	-16,978415	-44,109249	92,979561	-26,191988	-51,760845
4	72,741417	-33,260868	-46,41317	76,497681	-14,196929	-51,930607
5	61,712246	-39,175144	-50,930302	68,33593	-21,334538	-60,639053
6	67,962326	-30,0917	-57,368145	71,306198	-46,709019	-57,748905
7	82,595467	-32,785225	-47,262989	64,877136	-30,1178	-65,679466
8	85,30246	-17,553427	-43,010738	86,714127	-28,112484	-61,586639
9	82,26162	-20,098623	-43,739166	94,10804	-28,808859	-45,395721
10	70,378067	-31,2358	-44,151573	71,684189	-11,573405	-57,452408
11	63,747215	-32,283482	-52,324829	76,687469	-32,915199	-52,455929
12	73,341263	-37,84013	-53,347492	68,059196	-38,739239	-57,27647
13	79,441231	-31,099894	-48,478367	68,508774	-26,543447	-69,517502
14	79,17646	-12,65299	-46,699707	94,507744	-33,865604	-55,050018
15	87,524277	-26,616356	-39,082878	80,002518	-14,219607	-53,782692
16	69,412132	-24,018183	-43,684528	79,889122	-11,771555	-59,170448
17	67,678787	-30,195808	-50,161003	82,055771	-37,478283	-48,538589
18	80,922386	-44,218567	-49,08923	63,382957	-27,574699	-64,191673
19	77,460228	-25,905092	-50,78677	77,704018	-32,709515	-67,788223
20	90,400284	-19,616095	-47,336655	91,707832	-33,258713	-52,35754
21	89,815437	-24,201199	-38,108173	83,151917	-12,729944	-57,848705
22	69,002472	-15,795324	-45,510101	84,072884	-25,509747	-52,016624
23	76,180794	-39,33942	-48,290688	73,097679	-30,684946	-51,425007
24	71,087364	-40,82618	-50,918404	64,219925	-27,908211	-67,576408
25	75,621758	-27,496529	-54,922977	83,782356	-40,191715	-59,59499
26	90,063896	-27,335329	-44,885212	78,429344	-21,669218	-56,509007
27	79,262146	-17,755486	-40,466778	80,043922	-13,420182	-57,360924
28	73,407242	-17,684271	-45,00914	80,430687	-26,154839	-48,093021
29	73,947411	-38,44577	-41,29147	62,536381	-22,887011	-56,62281
30	57,638111	-30,548326	-52,230507	72,674057	-36,643776	-62,83683
31	74,194344	-32,567017	-54,996098	79,342255	-35,532696	-58,673485
32	88,509445	-31,262388	-43,474751	82,40451	-15,336969	-61,031811
33	77,41185	-13,052848	-47,908447	92,127159	-23,54409	-50,991531
34	85,792511	-27,724442	-40,312614	73,365906	-23,728302	-50,441792
35	73,289398	-32,894043	-42,614464	67,699417	-24,911106	-63,838902
36	58,398731	-26,222971	-56,27264	72,944298	-41,88739	-60,616928

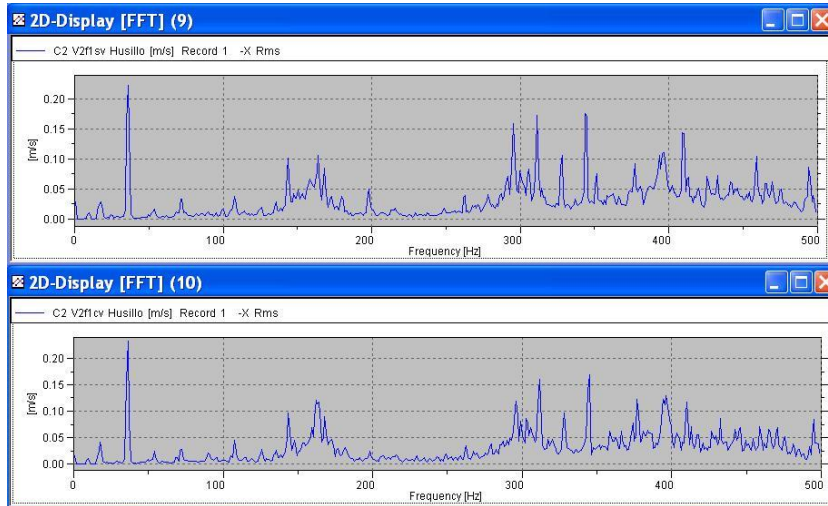


Figura A-10. Frecuencias en el husillo para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

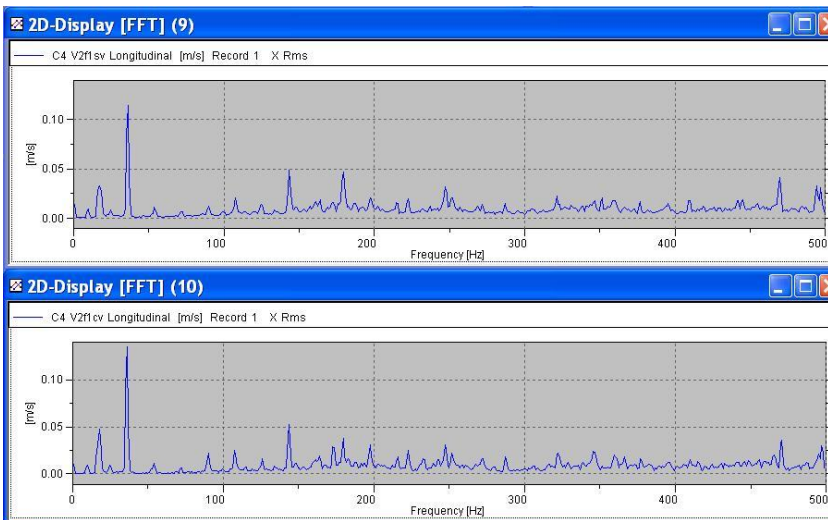


Figura A-11. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

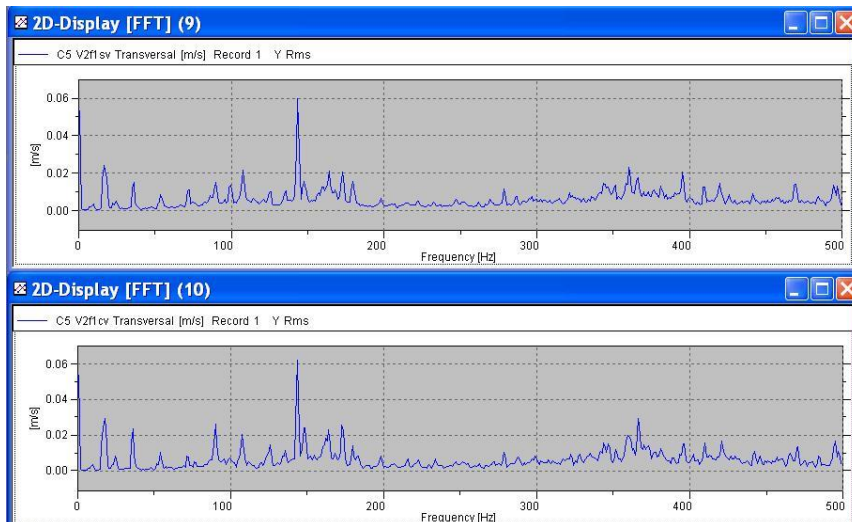


Figura A-12. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

5) $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 416$ mm/minTabla A-5. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 416$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	134,488007	-44,55312	-66,234398	116,932114	-35,869583	-47,786522
2	119,123405	-28,160259	-61,682091	130,265884	-37,397659	-50,398323
3	111,247139	-38,467419	-64,447266	108,681435	-61,174049	-56,907391
4	113,995972	-53,93441	-62,035782	131,565796	-39,709293	-39,913383
5	105,655983	-42,124779	-72,975777	128,904083	-39,271202	-53,429752
6	128,543182	-42,439205	-67,527603	106,585365	-42,701996	-53,903496
7	127,645332	-32,760265	-57,668621	133,925308	-26,655048	-38,605988
8	118,733505	-17,985979	-62,088104	140,561401	-52,468803	-52,173573
9	124,164627	-50,038071	-63,27985	116,471764	-44,566269	-55,33836
10	110,878189	-48,659626	-67,078308	130,901718	-17,177135	-45,321865
11	129,42215	-39,351372	-72,784935	121,007439	-54,278316	-53,05407
12	135,635132	-41,713593	-60,310398	120,116882	-55,830677	-46,45932
13	126,352196	-25,126181	-58,023815	130,95932	-25,386616	-44,298153
14	125,449898	-34,441956	-62,117367	106,484909	-46,202972	-58,558987
15	123,517792	-43,630451	-59,507771	121,524536	-45,9151	-43,153622
16	113,967674	-35,972595	-74,11602	134,949387	-42,192535	-41,405823
17	128,430069	-36,681374	-67,044724	110,380173	-45,751503	-58,801373
18	136,705521	-33,995243	-56,560776	104,983368	-26,952827	-47,042942
19	117,326866	-15,808088	-62,578861	132,82869	-38,555939	-43,194107
20	129,600891	-41,287025	-60,594273	125,814674	-54,949059	-51,49715
21	114,800949	-41,277836	-66,757332	126,903511	-28,016144	-48,56221
22	121,223618	-32,902225	-74,12336	126,67572	-27,549604	-52,071877
23	142,457367	-53,9221	-58,531693	119,15538	-58,955521	-48,767147
24	117,229698	-18,412104	-60,376457	138,645142	-40,713184	-37,276299

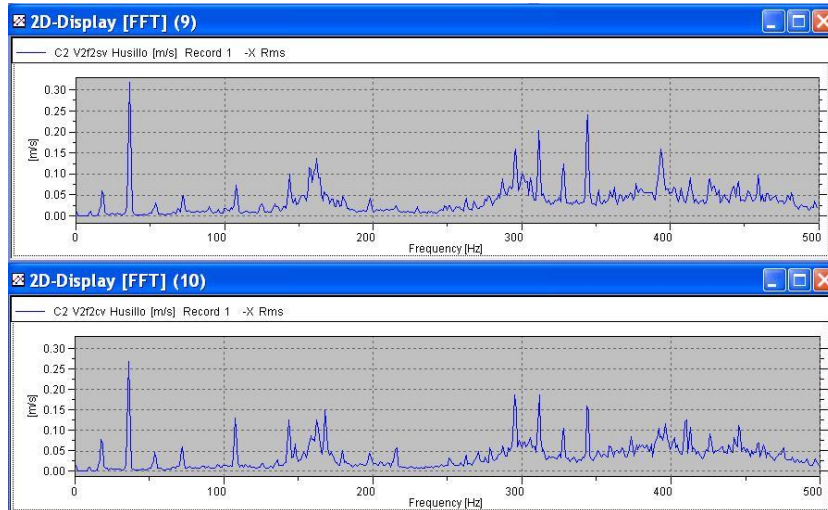


Figura A-13. Frecuencias en el husillo para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

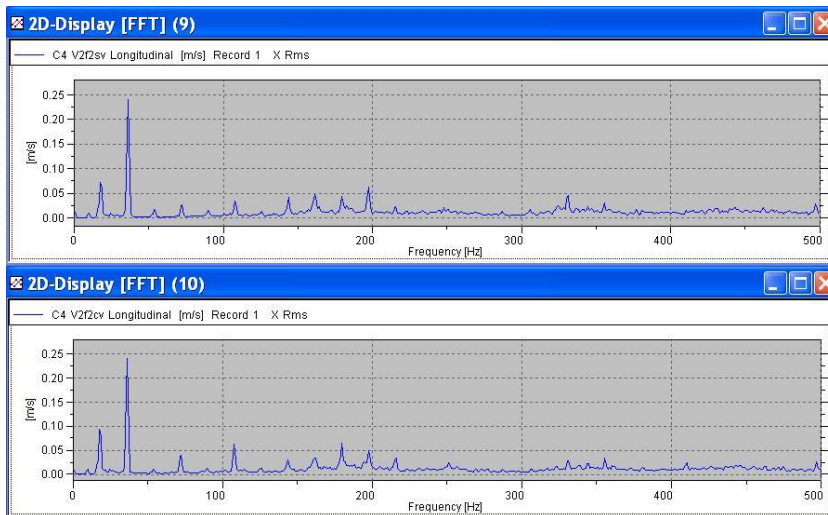


Figura A-14. Frecuencias dirección longitudinal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

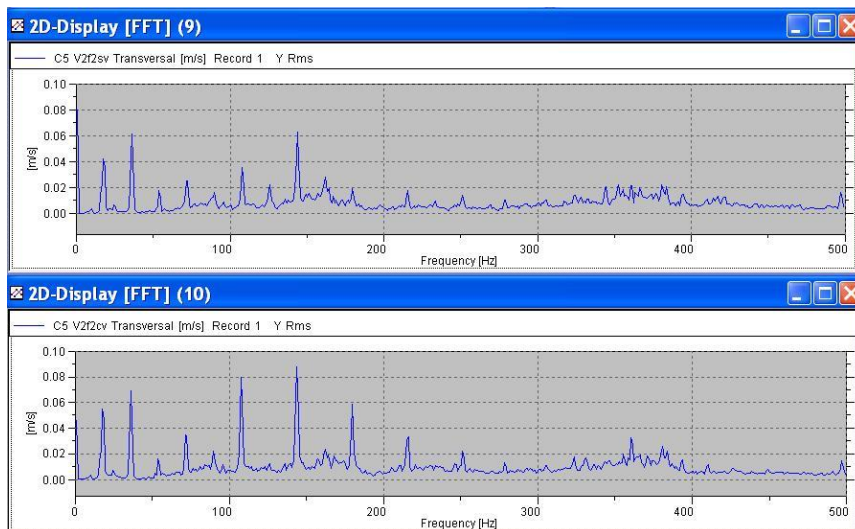


Figura A-15. Frecuencias dirección transversal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

6) $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 625$ mm/minTabla A-6. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 29,21$ m/min y $V_f = 625$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	151,950958	-73,969528	-34,778885	145,567719	-45,778519	-31,264568
2	165,757462	-64,506866	-21,946312	164,938995	-67,225098	-43,561489
3	163,498306	-59,113956	-37,550713	152,023132	-81,85701	-43,722015
4	142,827271	-61,175686	-33,546215	171,743301	-53,448235	-35,493191
5	167,115875	-54,956776	-25,735064	145,978317	-62,643326	-54,350182
6	152,096222	-82,089203	-32,614048	154,247635	-56,127922	-34,588253
7	173,931442	-60,555241	-18,001156	186,633789	-69,959709	-33,783302
8	162,453217	-72,380028	-36,276146	158,784973	-82,6362	-46,716484
9	146,808914	-50,406445	-30,109087	159,940216	-42,208649	-40,624187
10	161,31282	-57,949291	-28,37335	157,82753	-63,943256	-44,777996
11	152,157654	-74,106689	-25,118496	153,16684	-77,338173	-32,700928
12	170,597382	-57,100872	-22,309216	172,786331	-52,673088	-36,633293
13	153,191818	-84,814613	-35,011799	153,229187	-70,476128	-51,630157
14	165,998047	-51,914005	-23,607534	160,62616	-50,212479	-35,903458
15	151,423203	-60,524429	-41,729259	168,866333	-55,651653	-42,002293
16	155,298141	-63,626938	-20,039106	154,066071	-75,39502	-39,806648

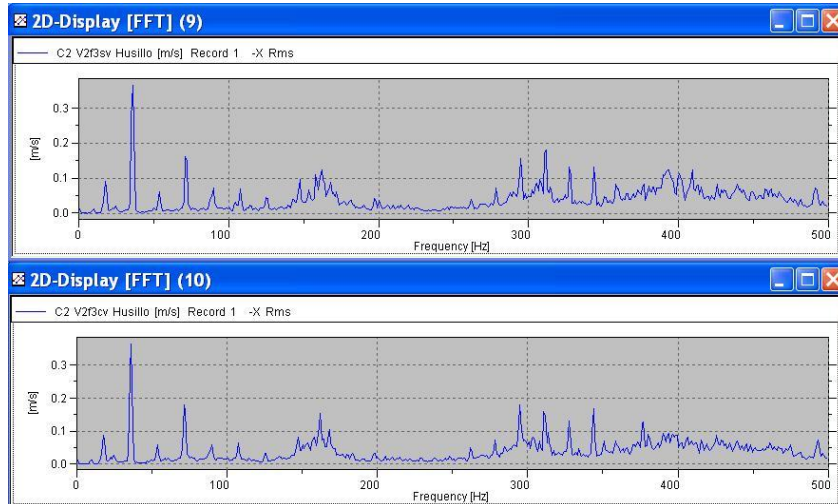


Figura A-16. Frecuencias en el husillo para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

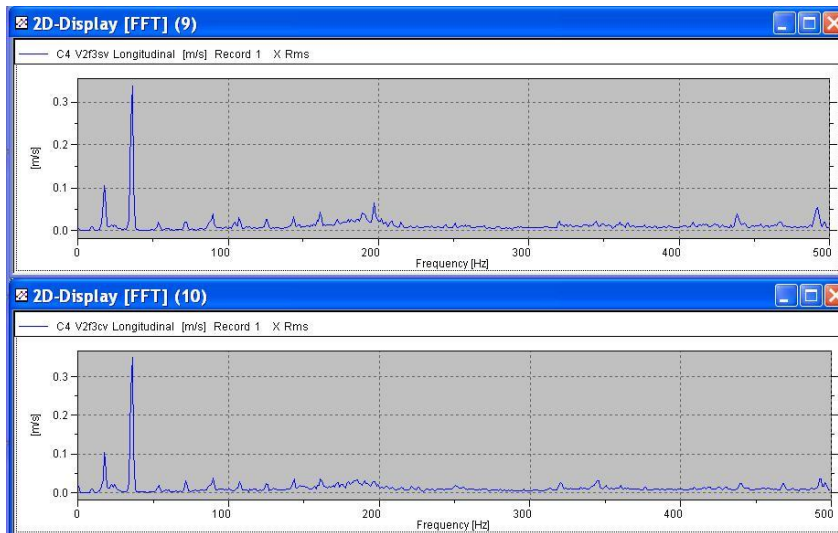


Figura A-17. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

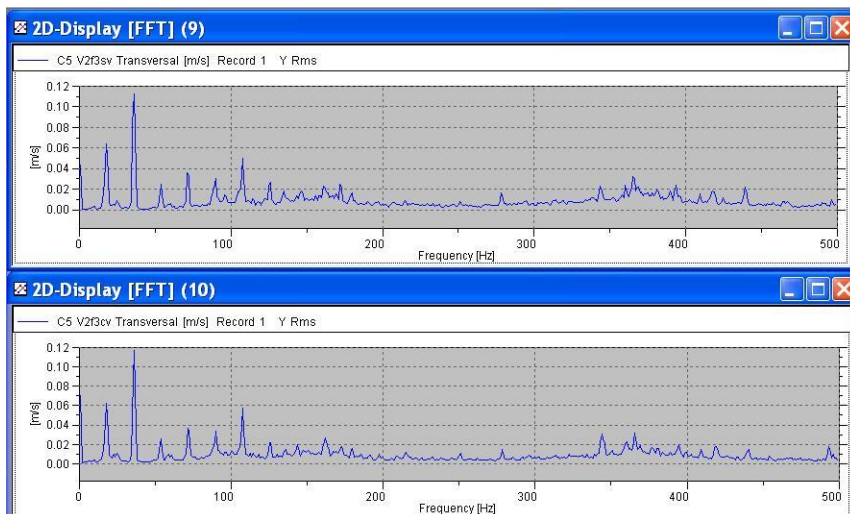


Figura A-18. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 29,21$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

7) $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 279$ mm/minTabla A-7. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 279$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	58,519367	-35,89222	-33,014057	61,193424	-19,768555	-47,163227
2	42,973412	-27,18327	-42,97448	58,024658	-32,175106	-45,328312
3	54,81673	-23,368355	-49,258793	46,690151	-25,001146	-53,715446
4	73,289696	-29,687223	-32,982437	63,093445	-38,659641	-53,019947
5	56,232594	-2,779587	-37,614418	60,074646	-23,693768	-51,768284
6	65,439262	-13,501374	-35,092293	63,47303	-8,628267	-52,578438
7	57,817142	-32,899391	-28,164709	83,295761	-24,762703	-35,764225
8	42,601158	-19,72123	-50,040249	64,168892	-7,16897	-40,179619
9	63,752838	-34,398121	-41,698204	57,32571	-14,684157	-44,158131
10	63,772106	-23,60697	-35,089859	56,847916	-35,389973	-41,708862
11	68,499336	-5,266532	-36,829933	53,859459	-29,270891	-54,283539
12	67,520523	-18,332222	-29,907751	67,196373	-33,157589	-54,00013
13	51,735546	-15,346584	-35,301517	65,512672	-22,130957	-51,150993
14	55,078316	-30,743404	-43,7831	75,461868	-16,404497	-49,197655
15	57,951954	-36,456841	-39,961567	79,553154	-21,20875	-35,914673
16	60,446175	-18,812204	-42,201218	62,340401	-5,091792	-43,383556
17	73,269638	-19,592329	-33,456272	70,307129	-27,266535	-42,278828
18	61,895542	-10,179945	-29,099514	56,790943	-34,554901	-44,294331
19	54,778919	-16,054789	-35,463997	51,023659	-28,840029	-59,743931
20	51,82254	-33,031406	-38,89526	68,650757	-36,297928	-51,342621
21	42,108482	-25,448519	-42,49073	60,978821	-18,762566	-49,420094
22	60,044716	-24,144072	-44,954304	75,997215	-14,084973	-46,173401
23	69,026207	-21,464466	-31,745356	68,337662	-13,228024	-38,837616
24	60,472691	-5,775354	-33,372974	62,67445	-11,789426	-42,208084
25	65,551071	-22,686687	-32,493	65,830605	-30,094477	-39,354576
26	53,356796	-34,022125	-33,709248	44,464905	-21,268795	-49,236397
27	44,513107	-22,859507	-46,919548	58,066605	-32,523712	-54,845409
28	67,338722	-34,335793	-40,024632	64,984505	-40,151024	-47,629543
29	65,219597	-19,209974	-35,667786	62,199657	-19,53145	-55,218826
30	66,568558	-6,752713	-37,780773	79,82415	-21,975592	-43,932804
31	76,070808	-27,741051	-24,614517	72,701996	-14,770005	-37,595589
32	45,026943	-24,247223	-37,167099	68,4534	-12,013549	-45,609951
33	53,894737	-27,529238	-47,283031	63,654438	-27,384281	-39,99715
34	67,875534	-42,471554	-36,844749	50,84473	-27,154976	-49,768127
35	60,410213	-11,551143	-41,637791	65,836716	-38,219006	-50,918625
36	74,740578	-17,925817	-34,911064	62,261086	-32,726173	-49,751328

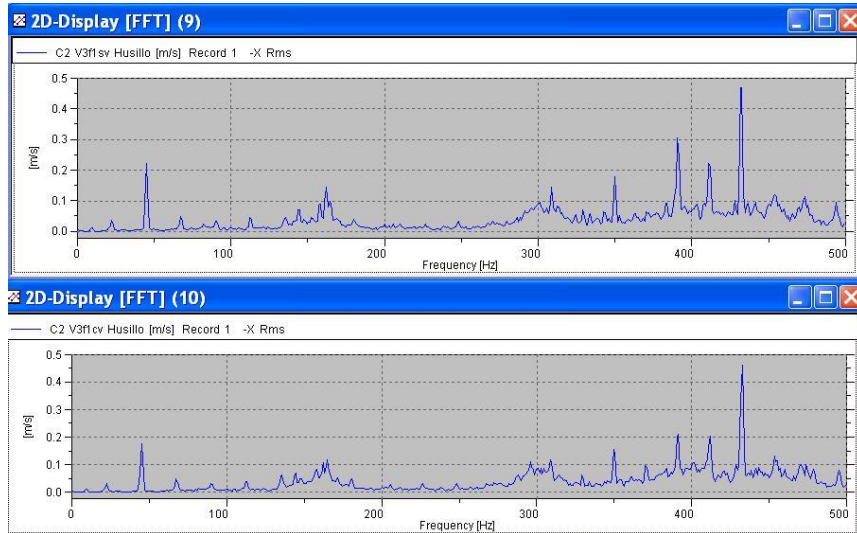


Figura A-19. Frecuencias en el husillo para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

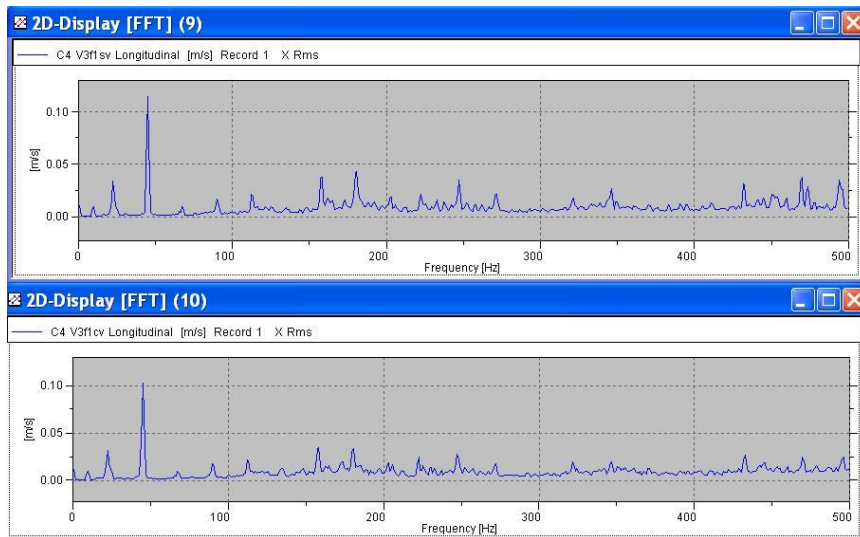


Figura A-20. Frecuencias en el dirección longitudinal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

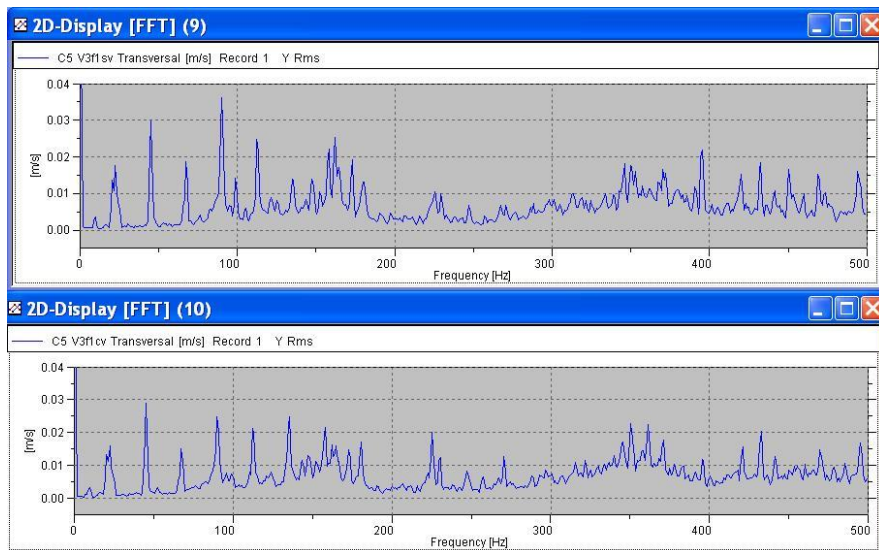


Figura A-21. Frecuencias en el dirección transversal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 279$ mm/min

8) $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 416$ mm/minTabla A-8. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26$ m/min y $V_f = 416$ mm/min

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	80,998611	-43,828209	-45,494747	96,367958	-22,388659	-37,147385
2	88,688416	-56,899734	-38,986912	92,258514	-21,312664	-43,893066
3	90,678612	-44,990654	-46,000248	90,45784	-35,93354	-37,169052
4	101,135651	-42,346409	-38,15218	74,020844	-34,114891	-47,110508
5	98,882332	-27,012423	-34,307407	90,800819	-52,791096	-47,413139
6	104,530899	-29,243359	-30,812469	80,894585	-47,0271	-52,549381
7	97,797966	-34,361687	-26,805492	96,044678	-39,096798	-52,464661
8	82,260406	-28,39213	-37,422718	114,321198	-43,90416	-38,843204
9	91,548714	-42,718197	-34,616928	92,500084	-14,670491	-40,248997
10	78,32708	-48,765816	-37,701851	103,04911	-27,133406	-39,943501
11	79,092705	-42,497524	-46,911083	86,023964	-31,979921	-31,122305
12	91,361488	-48,606441	-40,450554	80,681427	-31,45941	-44,344257
13	93,442886	-35,286022	-39,546711	84,679474	-50,257046	-45,382996
14	103,924637	-37,512325	-32,146793	78,309311	-44,434292	-47,390766
15	99,425415	-26,565996	-29,215893	98,634583	-45,987007	-47,562443
16	89,35231	-25,344742	-33,365013	91,764687	-35,34222	-44,911037
17	97,399986	-49,678768	-26,842337	95,978897	-22,835373	-45,118176
18	70,173462	-40,061554	-39,203949	107,644844	-38,348812	-30,869314
19	80,684265	-43,27618	-43,087246	87,890213	-21,398031	-34,883789
20	88,316711	-54,363548	-36,203583	83,538879	-28,195911	-44,921013
21	84,174881	-31,121897	-46,780247	83,598465	-50,491161	-39,235325
22	103,732445	-44,184311	-36,916035	73,116455	-43,377251	-53,338718
23	90,546288	-19,135338	-33,967468	87,777504	-44,114418	-51,722733
24	100,463768	-30,969961	-28,569517	96,1614	-36,034534	-45,581722

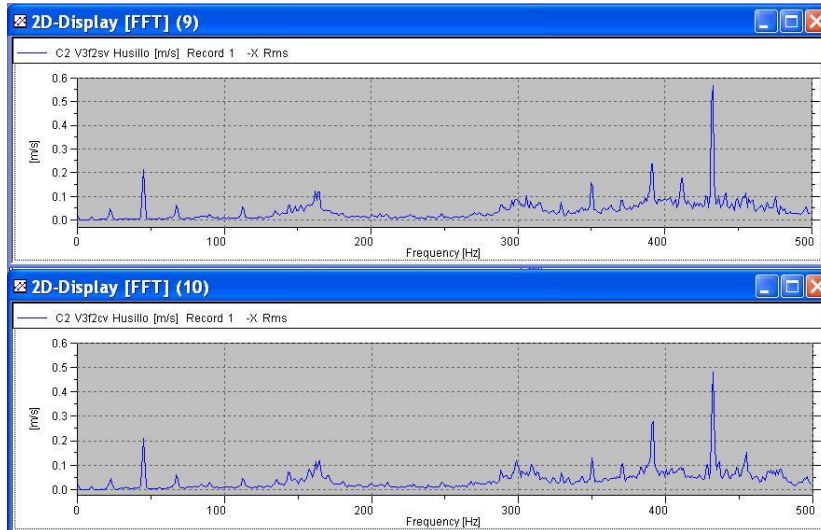


Figura A-22. Frecuencias en el husillo para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

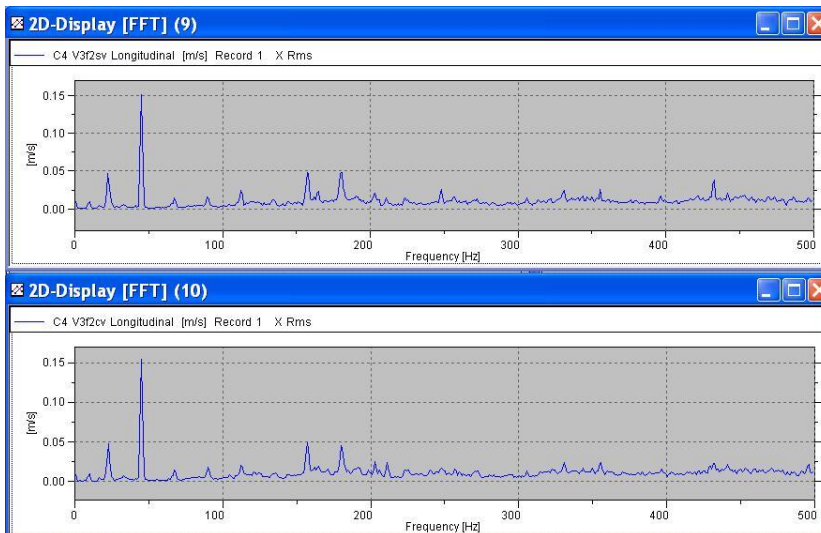


Figura A-23. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

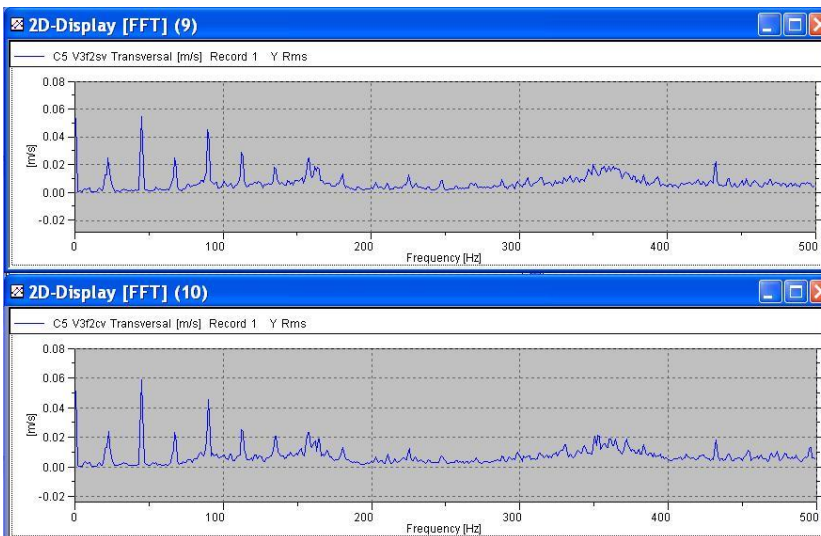


Figura A-24. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 416$ mm/min

9) $V_c = 39,26 \text{ m/min}$ y $V_f = 625 \text{ mm/min}$

Tabla A-9. Resultados de fuerzas de los dos procesos para $V_c = 39,26 \text{ m/min}$ y $V_f = 625 \text{ mm/min}$

Tiempo (s)	Sin vibración			Con vibración		
	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	129,110535	-35,589855	-35,802937	141,924789	-59,732307	-26,219488
2	137,360336	-55,953831	-24,857847	139,448853	-47,199169	-24,302515
3	117,890778	-41,444298	-36,889797	142,147873	-45,735703	-25,204863
4	125,524773	-59,945045	-39,650864	134,440384	-48,5331	-17,723993
5	120,333534	-63,081635	-37,326988	121,807114	-41,642899	-28,581999
6	115,613548	-56,076519	-48,874744	131,537476	-66,371773	-20,909616
7	134,556427	-64,253151	-34,396694	116,415451	-56,007046	-28,829716
8	124,644371	-42,695911	-38,217224	118,313843	-58,177235	-36,082516
9	144,350784	-50,661285	-31,032713	127,540291	-65,045341	-29,738821
10	131,521072	-43,629791	-28,168842	131,775024	-54,984238	-33,059799
11	127,2939	-38,355019	-35,10405	146,171692	-59,229862	-23,596416
12	133,750961	-60,107254	-25,471243	134,246368	-43,234314	-23,875944
13	111,884605	-46,530869	-36,8279	143,764481	-44,953842	-21,863409
14	125,271973	-57,049816	-43,003452	138,399338	-53,804184	-12,708061
15	120,57164	-62,696114	-40,11718	121,800774	-44,35762	-26,572676
16	124,520508	-48,388165	-44,681965	126,736908	-61,078754	-23,176699

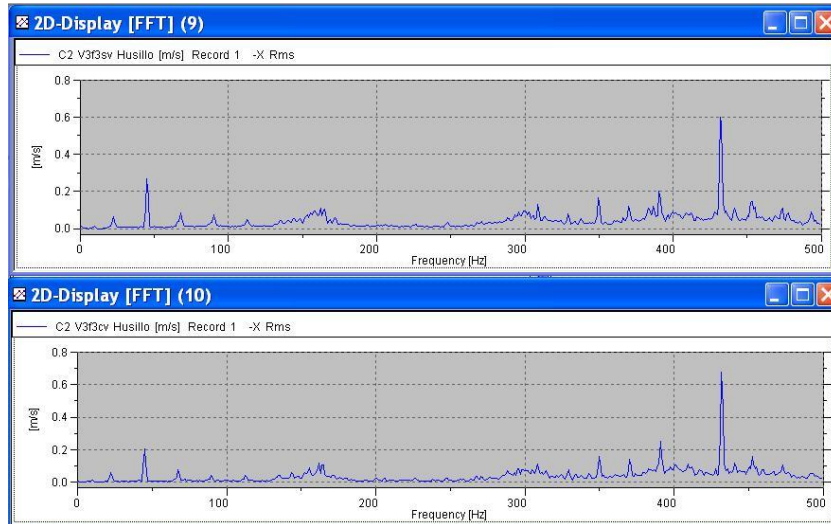


Figura A-25. Frecuencias en el husillo para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

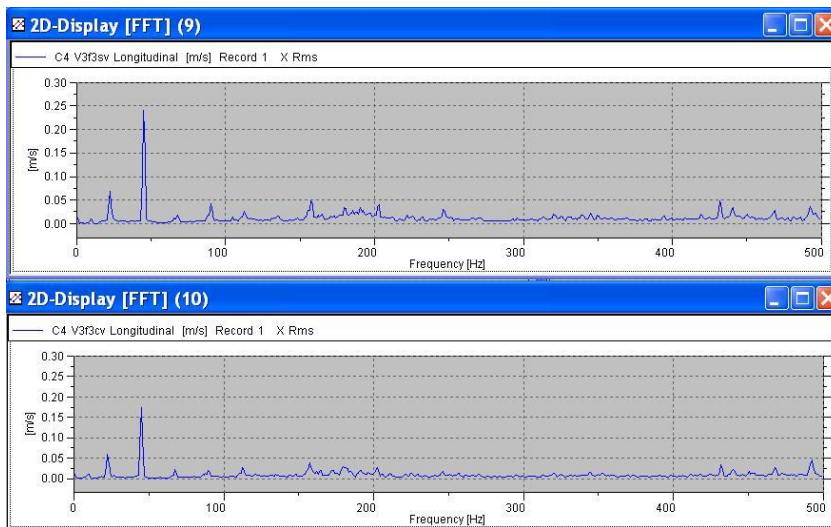


Figura A-26. Frecuencias en dirección longitudinal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 625$ mm/min

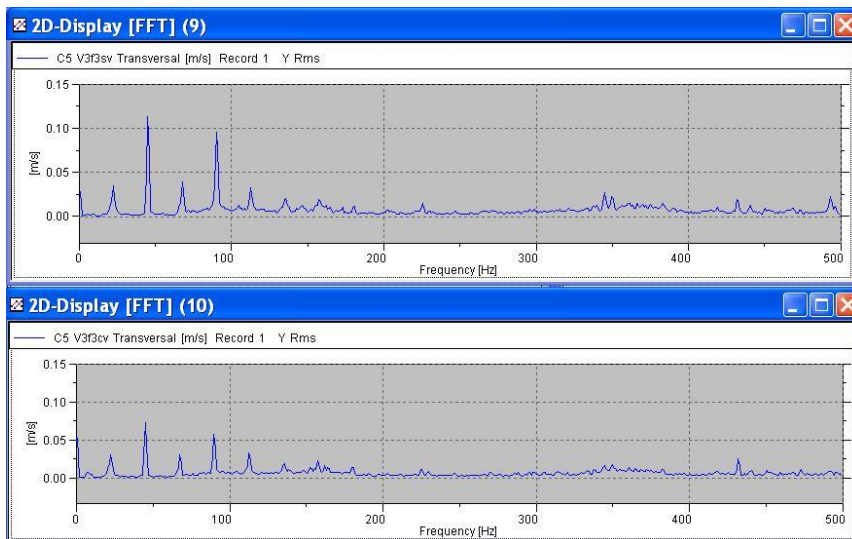


Figura A-27. Frecuencias en dirección transversal para $v_c = 39,26$ m/min y $v_f = 625$ mm/min