UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Aportes a la fabricación de micro cavidades mediante fresado para generar superficies con textura

Ing. Juan Hilario Martínez Pinilla

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingeniería, Departamento Mecánica

Bogotá, Colombia

2018

Aportes a la fabricación de micro cavidades mediante fresado para generar superficies con textura

Ing. Juan Hilario Martínez Pinilla

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

Ph.D. José Manuel Arroyo Osorio

Línea de Investigación:

PROCESOS DE MANUFACTURA.

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ingeniería, Departamento Mecánica

Bogotá, Colombia

2018

Agradecimientos.

A mi familia por ser el soporte, la energía y la compañía en todas las fases de mi aprendizaje, al apoyo recibido por el Ingeniero José Manuel Arroyo, por las herramientas de discernimiento con las cuales me guió y me mantuvo enfocado en un objetivo.

A HIDMEC Ingeniería S.A.S, por el apoyo en el proceso experimental, por sus ideas, por la paciencia y el cariño mostrado, a todas y cada una de las personas que componen esta pequeña gran empresa. A la UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA en especial al grupo de investigación VOLTA, por el apoyo en el proceso de validación de las estructuras, la amabilidad de cada uno de sus colaboradores, el apoyo en los procesos de aclaración y la capacidad de adaptación presentada para cada una de las dudas presentadas.

A mis amigos que son un gran tesoro, por su pregunta recurrente de ¿Y para cuándo el grado? Por ser unos pilares en el desarrollo de mis momentos de esparcimiento fundamentales y necesarios para darme cuenta de que paso a paso iba por buen camino, un gran camino.

Resumen

Las superficies de diversos componentes son modificadas para darles características particulares de funcionamiento, para ello se utilizan diversos métodos, entre ellos ablación con láser y variantes del proceso de maquinado denominadas *fly cutting*. Los recursos necesarios para la producción de superficies con patrones de microcavidades utilizando *fly cutting* conllevan el uso de equipos no convencionales de alto costo, con características como inducción de vibraciones de precisión con un alto grado de resolución del proceso, para obtener rasgos micro o nanométricos. El presente trabajo, se enfocó en generar estructuras de superficie implementando el método *fly cutting* en máquinas convencionales, buscando lograr este tipo de superficies con tecnología usual en la industria de maquinado.

Sobre probetas de bronce SAE 40, se realizaron experimentos preliminares para seleccionar las herramientas de corte y los métodos de fabricación de las estructuras de superficie basadas en microcavidades obtenidas por maquinado. Se planteó así el trabajo con tres tipos diferentes de herramientas de corte: herramienta para torneado de roscas, herramienta cola de milano y fresa frontal de insertos rectos. Como resultado de los experimentos preliminares, se descartó el uso de la herramienta cola de milano por el riesgo que presentó para la máquina en el proceso de maquinado, el proceso de fresado frontal se descartó también debido al tipo de estructura anisotrópica que produce, por último, se decidió explorar más a fondo la fabricación de texturas de superficie usando una herramienta de torneado de roscas dado que con este método es posible obtener texturas homogéneas en superficies incluso de gran área.

Para la estrategia de fabricación seleccionada, se desarrolló un método de modelado CAD usando una combinación de MatLab y de SolidWorks, el modelado del proceso permite diseñar y visualizar las estructuras de superficie antes de la fabricación. Los factores de diseño de las estructuras propuestas son la frecuencia rotacional y la velocidad de avance. Se fabricaron cuatro tipos de estructuras para las cuales se programó desfase vertical y horizontal en el inicio de cada trayectoria de maquinado, obteniendo dos texturas con aristas en la superficie debidas a la distancia programada de desfase vertical. En todas las estructuras fabricadas se presentó retemblado (*chatter*) debido esencialmente al voladizo de la herramienta en el montaje.

La topografía de las estructuras de superficie se examinó mediante microscopia electrónica de barrido y mediante microscopia óptica; se logró establecer que el método de fabricación produce resultados muy próximos a los obtenidos en la fase de modelado CAD, con diferencias debidas al montaje y precisión de la máquina herramienta utilizada.

Adicionalmente se concibió un ensayo reciprocante de desgaste no estándar para evaluar la capacidad de las estructuras de superficie producidas como reservorios de lubricante en aplicaciones con piezas deslizantes utilizando como criterio de evaluación del ensayo la pérdida de masa en las probetas. Se observó que las estructuras con aristas en la superficie muestran un mayor grado de desgaste.

El trabajo desarrollado permitió establecer que es factible usar variantes de bajo costo del proceso de maquinado convencional para obtener superficies con textura basadas en microcavidades. También que es relativamente sencillo realizar el modelado del proceso para diseñar las estructuras antes de su fabricación.

Palabras clave: fly cutting, estructura de superficie, modelamiento

Abstract

The surfaces of various components are modified to give them particular characteristics of operation, for which various methods are used, among them laser ablation and variants of the machining process called fly cutting. The necessary resources for the production of surfaces with microcavities patterns using fly cutting entail the use of non-conventional equipment of high cost, with characteristics such as induction of precision vibrations with a high degree of process resolution, to obtain micro or nanometric features. The present work, focused on generating surface structures implementing the fly cutting method in conventional machines, seeking to achieve this type of surfaces with the usual technology in the machining industry.

On SAE 40 bronze specimens, preliminary experiments were carried out to select the cutting tools and the fabrication methods of the surface structures based on microcavities obtained by machining. The work was thus proposed with three different types of cutting tools: tool for turning of threads, tool dovetail and front milling of straight inserts. As a result of the preliminary experiments, the use of the dovetail tool was ruled out due to the risk it presented to the machine in the machining process, the front milling process was also ruled out due to the type of anisotropic structure that it produces, finally , it was decided to further explore the manufacture of surface textures using a thread turning tool since with this method it is possible to obtain homogeneous textures on even large area surfaces.

For the selected manufacturing strategy, a CAD modeling method was developed using a combination of MatLab and SolidWorks, the process modeling allows to design and visualize the surface structures before manufacturing. The design factors of the proposed structures are the rotational frequency and the forward speed. Four types of structures were manufactured for which vertical and horizontal offset was programmed at the start of each machining path, obtaining two textures with edges on the surface due to the programmed distance of vertical offset. In all the fabricated structures, it was presented as a chatter due essentially to the overhang of the tool in the assembly.

The topography of the surface structures was examined by scanning electron microscopy and by light microscopy; it was established that the manufacturing method produces results very close to those obtained in the CAD modeling phase, with differences due to the assembly and precision of the machine tool used.

Additionally, a non-standard wear reciprocating test was designed to evaluate the capacity of the surface structures produced as lubricant reservoirs in sliding part applications, using the loss of mass

in the specimens as the evaluation criterion of the test. It was observed that structures with edges on the surface show a greater degree of wear.

The work developed allowed to establish that it is feasible to use low cost variants of the conventional machining process to obtain textured surfaces based on microcavities. It is also relatively easy to perform the modeling of the process to design the structures before they are manufactured.

Keywords: fly cutting, surface structure, modeling

Contenido

Agradecimientos....3
Resumen....4
Abstract....6
Lista de figuras....9
Lista de tablas....11
1. Introducción....1
1.1. Superficies con textura obtenidas por maquinado....1
2. Objetivos....11
3. Materiales y métodos....12
3.1. Equipos y materiales....12
3.2. Herramientas de corte....12
3.3. Ensayo de desgaste no estándar....14
3.4. Modelado de las superficies....16
4. Resultados y discusión....17
4.1. Ensayos preliminares....17
4.2. Modelado de la estrategia de maquinado seleccionada....23
4.3. Fabricación y caracterización de las superficies seleccionadas....26
4.4. Resultados ensayo de desgaste....31
5. Conclusión....39
6. Referencias....41
Anexos....44
Anexo 1....44
Anexo 2....45
Anexo 3....48
Anexo 4....49
Anexo 5....50

Lista de figuras

Figura 1. Montaje Radial UFPC (Denkena et al., 2012).....4

Figura 2. Radial UFPC, a) modelado de la textura. b) textura fabricada (Denkena et al., 2012). 4

Figura 3. Radial-UFPC con accesorio piezo eléctrico (Denkena, Kästner & Wang, 2010), ...5

Figura 4. Resultados de los ensayos tribológicos (Denkena et al. 2012).....5

Figura 5. End UFPC (Xu, Shimada, MIzutani & Kuriyagawa, 2014). 6

Figura 6. Modelado de la trayectoria de End-UPFC y el resultado obtenido. (Xu, Shimada, Mizutani & Kuriyagawa, 2014).....6

Figura 7. Montaje de fresado frontal modificado para generar una superficie texturizada (Hadad, 2016). 7

Figura 8. Comparación entre la textura simulada y la textura obtenida (Hadad & Ramenazi, 2016)......7

Figura 9. Configuraciones cinemáticas experimentadas por Yan Zhang & Kuriyagawa (2010) para maquinar texturas de superficie. 8

Figura 10. Texturas de superficie fabricadas por Yan Zhang & Kuriyagawa (2010). 8

Figura 11. Fabricación de texturas de superficie propuesta por Cheng et al. (2008). 9

Figura 12. Montaje experimental y modelo fly cutting planteado por Sun, To & Zhang (2018) 9

Figura 13. Herramienta de corte H1 usada normalmente para torneado de roscas (Kennametal 2018).....13

Figura 14. Herramienta de corte H2 para la realización de experimentos preliminares. 13

Figura 15. Herramienta de corte H3 para la realización de experimentos preliminares (Mitsubishi Materials, 2018). 14

Figura 16. Mecanismo para el ensayo de desgaste......15

Figura 17 diagrama de flujo proceso de modelamiento de estructuras. 16

Figura 18. Esquema del movimiento de maquinado en el ensayo 1. 17

Figura 19. Ensayo 1, usando oscilación (zig-zag) por programación CNC......18

Figura 20. Ensayo 2, con fresa frontal de 60 mm y un único diente. 19

Figura 21. Ensayo 2, superficie obtenida con una pasada. 19

Figura 22. Ensayo 2, superficie obtenida con dos pasadas perpendiculares. 20

Figura 23. Cinemática del ensayo 3. 21

Figura 24. Ensayo 3, montaje experimental. 21

Figura 25. Desarrollo de las estructuras por mecanizado lateral. 23

Figura 26. Modelado de una microcavidad generada en un giro de la herramienta. 24

Figura 27. Modelado resultante en caso de traslape de los rasgos. 24

Figura 28. Modelado de las texturas seleccionadas para fabricación. velocidad de avance de 1000 mm/min, frecuencia de rotación del husillo de 500 min-1 e interferencia máxima con el material de 0.25 mm. 25

Figura 29. Montaje experimental, herramienta T1 y sentido concordante de corte. 26

Figura 30. Resultados modelado y experimental textura Tex1. 27

Figura 31. Resultados modelado y experimental textura Tex2. 28

Figura 32. Resultados modelado y experimental textura Tex3. 29

Figura 33. Resultados modelado y experimental textura Tex4. 30

Figura 34. Montaje experimental para el ensayo de desgaste reciprocante. 32

Figura 35. Resultados experimento exploratorio de desgaste. 34

Figura 36. Resultados experimento exploratorio de desgaste. (continuación) 35

Figura 37. Propuesta de texturas como trabajo futuro. 36

Figura 38. Evaluación del comportamiento tribológico de estructuras de superficie. Grooper, Wang & Harvey (2016) 37

Lista de tablas

Tabla 1. Aplicaciones de las superficies con textura (Evans & James, 1999) 2

Tabla 2. Parámetros experimento 3 22

Tabla 3. Parámetros del ensayo de desgaste. 32

Tabla 4. Pérdida de masa [mg] en los ensayos de desgaste......33

1. Introducción

Las superficies de muchos componentes son modificadas para darles características particulares de desempeño, dichas superficies con geometrías determinadas (o superficies con textura) son ampliamente usadas en diferentes campos de la ingeniería como es descrito por Evans & James (1999), estos autores describen aplicaciones en óptica y en la adhesión de pegamentos entre otros. Para la fabricación de superficies con textura con rasgos micro y nanométricos se ha utilizado principalmente el procesamiento de ablación con láser, según lo afirmado por Ryk, Kligerman & Etsion (2002).

Una alternativa emergente para la fabricación de superficies con textura es un proceso de fabricación por maquinado denominado *fly cutting*, en el cual, con herramientas de un solo filo, se generan texturas con diferentes geometrías sobre superficies planas o cilíndricas, utilizando en varios casos vibraciones controladas con piezoeléctricos. Zhang, To, Zhu, & Zhang (2016), describen los diferentes procesos desarrollados agrupándolos de acuerdo con características particulares como el movimiento de avance y la orientación de la herramienta de corte.

En el desarrollo del presente trabajo de tesis se realizó una exploración de posibilidades de fabricación de texturas de superficie a partir del maquinado de microcavidades, utilizando variaciones de bajo costo del proceso de fresado convencional. También se realizó un modelo para diseñar las texturas con base en uno de tres procesos explorados.

1.1. Superficies con textura obtenidas por maquinado

Según Evans & James (1999), una superficie "con textura" se puede definir como un conjunto regular de características de la superficie, susceptibles de una descripción determinista. Estos autores también recopilaron varias de las aplicaciones de las superficies con textura presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Aplicaciones de las superficies con textura (Evans & James, 1999)

Función	**Ejemplo**
Óptica.	Lentes fresnel. Óptica difractiva. Señales de tránsito reflectivas. Filtros. Espejos de longitud de onda específica.
Contacto metálico.	Inyectores Diesel. Anillos para pistón. Anillos de sincronización. Superficies de discos duros. Velcro.
Hidrodinámica.	Surcos en llantas. Cubiertas de zapatos. Película de reducción de resistencia. Pelotas de Golf.
Dispositivos para metrología.	Dispositivos para prueba de distorsión. Rugosímetros. Dispositivos para pruebas táctiles.
Fricción y desgaste.	Superficies onduladas. Abrasivos y herramental.
Biológico.	Sistemas de cultivo de células. Electroforesis capilar. (separación de moléculas) Sistemas micro electromecánicos biomédicos.
Adhesión.	Sellos de agua. Sellantes dentales epóxicos. Preparación para aplicación de pinturas.
Térmicos.	Aspas de intercambiadores de calor.

De Chiffre, Hunzmann, Peggs & Lucca (2003), definen las superficies con textura como interfaces que rigen el desempeño funcional de un producto y mencionan que a menudo, los mecanismos de control del desempeño implican detalles de superficie en escala micro y/o nanométrica. Estos autores también describen las funcionalidades de las superficies con textura en sistemas biomédicos, en tecnologías para el almacenamiento de información y en sistemas ópticos de alta precisión. Dentro de los procesos de fabricación por maquinado, mencionan el fresado y torneado con herramientas de alta precisión de diamante y con asistencia de vibración externa en dirección perpendicular al avance.

El proceso denominado *fly cutting*, es un grupo de variaciones de los procesos de maquinado convencionales con el propósito de fabricar superficies con textura. Generalmente mediante la implementación de piezoeléctricos para inducir micro-movimientos oscilatorios perpendicularmente al movimiento de avance. Al igual que en los procesos de maquinado convencionales (torneado, taladrado, fresado, etc.), los parámetros de proceso que se evalúan son, entre otros, la velocidad de corte, la velocidad de avance, el avance por diente, las trayectorias de maquinado, los errores de montaje, las características de las herramientas de corte y las propiedades de la pieza a maquinar (Cardoso & Davim, 2012; Zhang & To, 2013; Denkena, Kästner & Göttsching, 2015).

A manera de ejemplo ilustrativo, se muestra la variante del proceso *fly cutting* denominada *Radial-UPFC* (Denkena, Kästner & Wang, 2010; Denkena et al., 2012), en este caso, se realizó una variación del proceso de torneado convencional. La herramienta de corte se posiciona paralela al eje del husillo como se observa en la figura 1, en la cual se muestran los montajes para superficies interiores y exteriores. La herramienta de corte está montada en un dispositivo piezoeléctrico, el cual produce oscilaciones perpendiculares a la superficie maquinada que finalmente se traducen en los patrones de microcavidades resultantes. En muestras de 18 mm de longitud y 20.3 mm de diámetro se obtuvieron micro cavidades con longitudes entre 1 y 2 mm, ancho entre 50 y 100 µm y profundidad entre 5 y 30 µm. A partir de los resultados obtenidos los autores reportaron que el proceso se puede controlar y reproducir y que se puede, a partir de modelos del proceso, predecir el tipo de cavidad generada, así como su distribución en la superficie. En la figura 2 se muestran las texturas de superficie obtenidas.

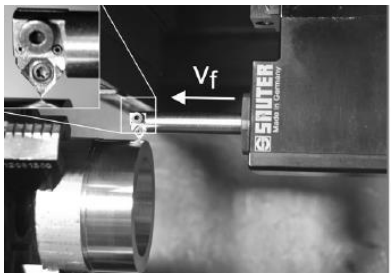


Figura 1. Montaje Radial UFPC (Denkena et al., 2012)

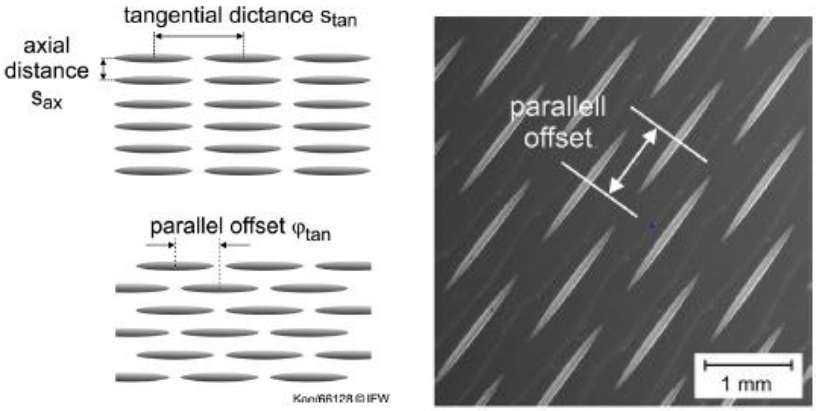


Figura 2. Radial UFPC, a) modelado de la textura. b) textura fabricada (Denkena et al., 2012).

En la figura 3, se muestra una variación del montaje *Radial-UFPC* específicamente para trabajo externo con el eje de la herramienta en dirección perpendicular a la superficie. Los autores también realizaron ensayos de contacto deslizante, encontrando que es posible obtener un mejor desempeño tribológico en las superficies con textura, pero que es necesario identificar las características de la textura que producen los mejores resultados (figura 4).

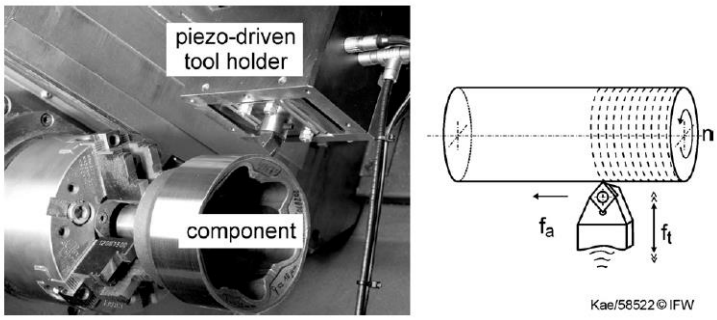


Figura 3. Radial-UFPC con accesorio piezo eléctrico (Denkena, Kästner & Wang, 2010),

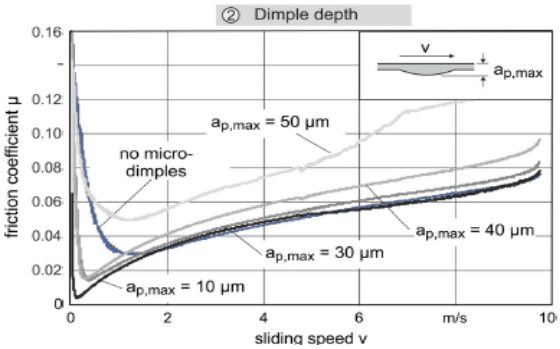


Figura 4. Resultados de los ensayos tribológicos (Denkena et al. 2012)

Una versión *fly cutting* que resulta de modificar el proceso de fresado se denomina *End-UPFC* (Xu, Shimada, Mizutani & Kuriyagawa, 2014) (figura 5). En este montaje se implementó un método para inducir vibración ultrasónica en el husillo de la máquina herramienta. Los autores también implementaron un modelo del proceso para diseñar las texturas a fabricar. En la figura 6 se muestra una imagen del modelado y una fotografía SEM de las texturas fabricadas.

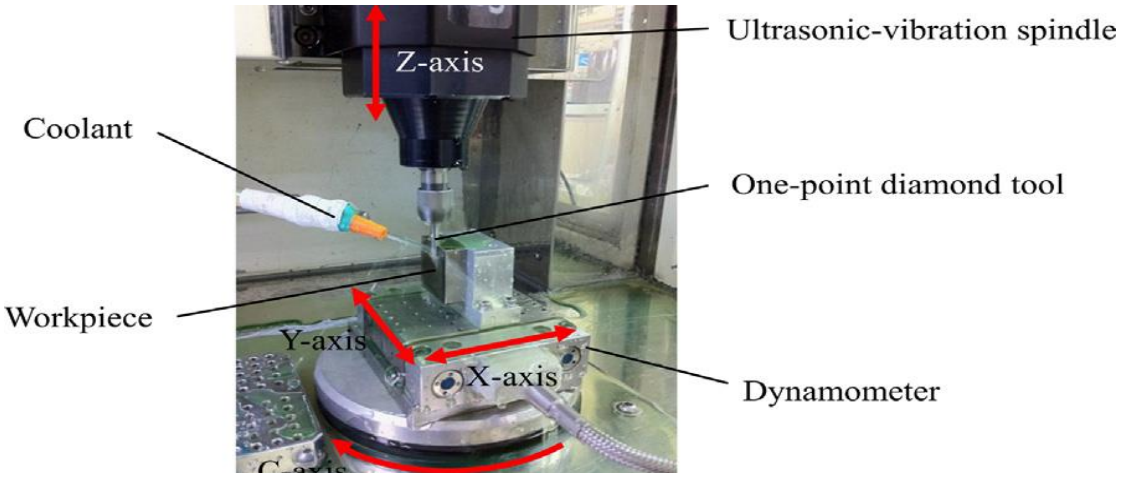


Figura 5. End UFPC (Xu, Shimada, MIzutani & Kuriyagawa, 2014).

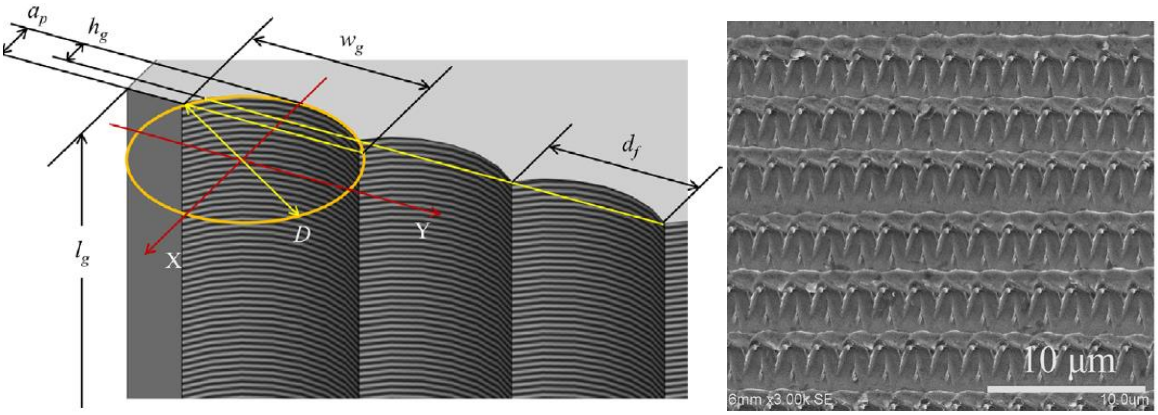


Figura 6. Modelado de la trayectoria de End-UPFC y el resultado obtenido. (Xu, Shimada, Mizutani & Kuriyagawa, 2014)

Hadad & Ramenazi (2016), exploraron otra posibilidad para generar superficies con textura, la cual consiste en la modificación de la configuración cinemática del proceso de fresado convencional. La estrategia usada se muestra en la figura 7, se observa que se introduce un ángulo de inclinación no usual entre la superficie de trabajo y el eje de la herramienta de corte en una operación base de fresado frontal. Los autores también describen cinemáticamente el proceso, analizan la textura que obtienen por simulación y la comparan con la textura experimental (figura 8).

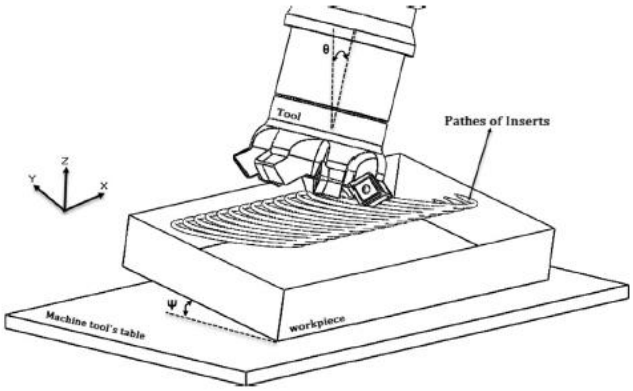


Figura 7. Montaje de fresado frontal modificado para generar una superficie texturizada (Hadad, 2016).

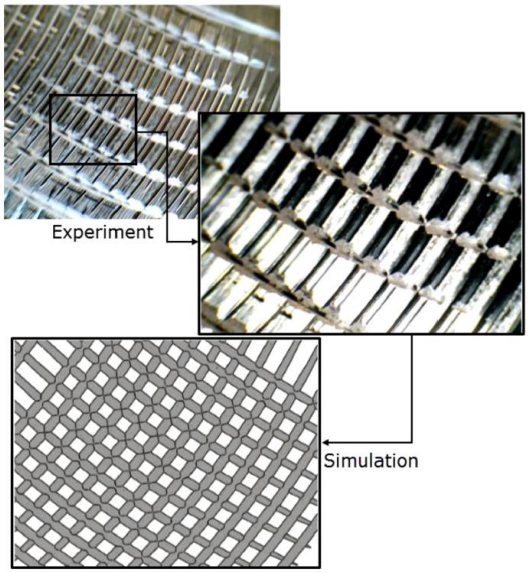


Figura 8. Comparación entre la textura simulada y la textura obtenida (Hadad & Ramenazi, 2016).

Otra configuración cinemática para fabricar superficies con textura fue propuesta por Yan, Zhang & Kuriyagawa, (2010) quienes proponen un montaje experimental con una herramienta posicionada a 45° con respecto a la superficie de trabajo (figura 9). En la experimentación los autores evalúan la producción de superficies con textura sobre una aleación de cobre de alta maquinabilidad,

obteniendo los resultados mostrados en la figura 10, en la cual se puede observar que la proyección cinemática que se había hecho resulta válida para el experimento y que es un proceso que se puede controlar y repetir.

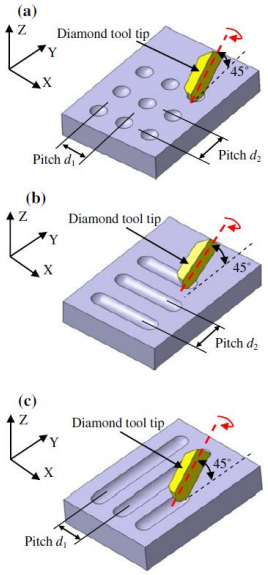


Figura 9. Configuraciones cinemáticas experimentadas por Yan Zhang & Kuriyagawa (2010) para maquinar texturas de superficie.

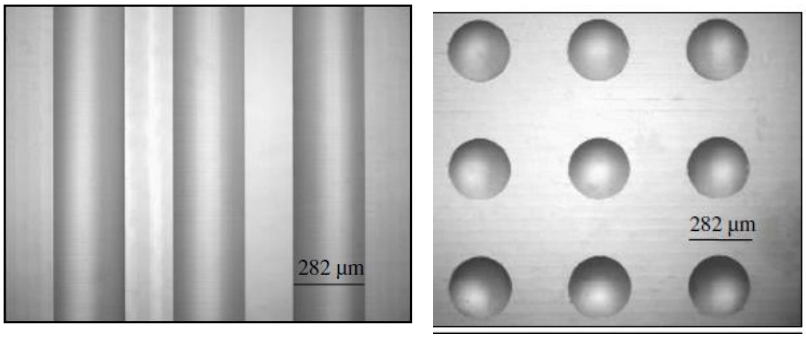


Figura 10. Texturas de superficie fabricadas por Yan Zhang & Kuriyagawa (2010).

Otro método *fly cutting* para producir superficies con textura, fue desarrollado por Cheng et al., (2008), estos autores utilizan vibración inducida en el husillo y presentan dos posibles trayectorias de trabajo (figura 11), una en dirección horizontal y otra en dirección vertical.

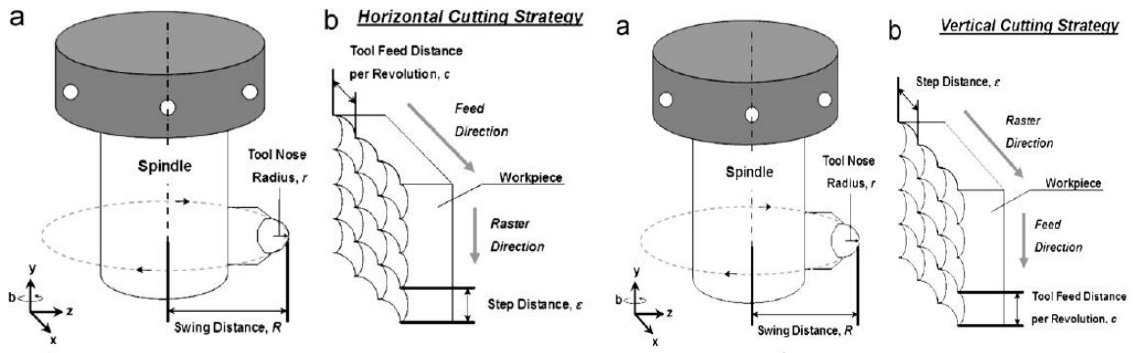


Figura 11. Fabricación de texturas de superficie propuesta por Cheng et al. (2008).

Sun, To & Zhang (2018), usaron un modelo cinemático análogo al presentado por Cheng et al. (2008), sin embargo, su objetivo es establecer la relación del modelo, con la mecánica de formación y desprendimiento de la viruta en materiales duros de difícil maquinado (figura 12).

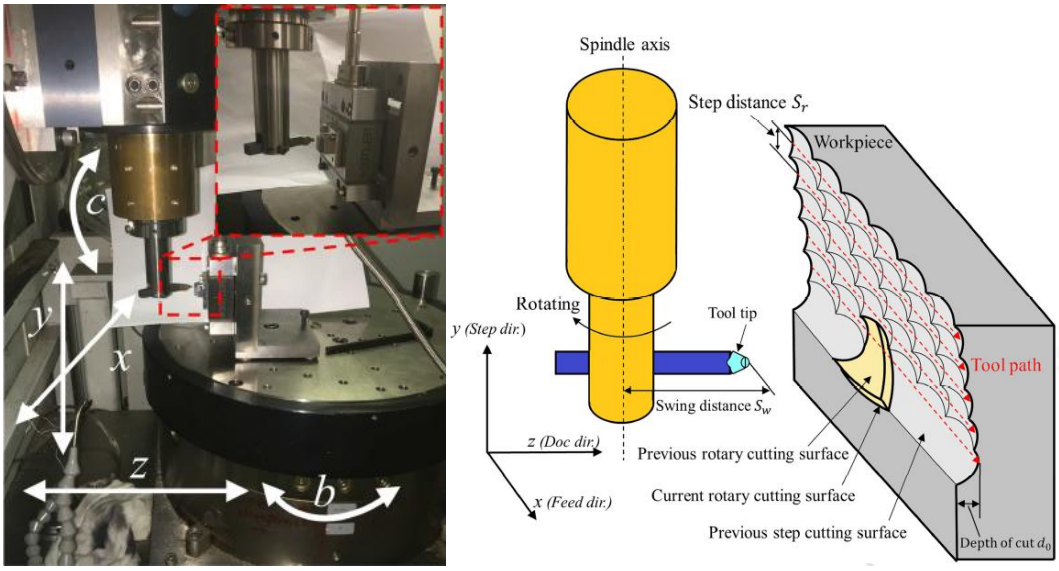


Figura 12. Montaje experimental y modelo fly cutting planteado por Sun, To & Zhang (2018)

Estos autores implementaron el proceso con una herramienta de diamante con radio de punta de 0.5 mm, en un torno de alta precisión de 4 ejes y demostraron que el montaje propuesto es apto para la fabricación de superficies estructuradas en materiales de difícil maquinabilidad.

Zhang, To, Zhu & Zhang (2016), resumen la siguiente metodología para el desarrollo de una superficie con textura: (1) definir la textura en correlación con el proceso de maquinado a implementar, (2) modelamiento y simulación, (3) fabricación y (4), análisis de la textura producida. La repetitividad de la producción de las texturas fabricadas es una característica primordial, así como el modelado para diseñarlas.

2. Objetivos

Para el desarrollo de la presente investigación se planteó la siguiente pregunta a partir de la literatura consultada: ¿Qué otras configuraciones cinemáticas son posibles para la fabricación de micro cavidades mediante fresado para generar superficies con textura?

La hipótesis es que existen otras configuraciones posibles para lograr la fabricación de superficies con textura utilizando variaciones de la cinemática del proceso de fresado convencional y a un costo menor que aquellas ya reportadas en la literatura.

Objetivo General

Modificar el proceso de fresado convencional con el objetivo de generar texturas de superficie.

Objetivos Específicos:

- Identificar variables del proceso de fresado convencional que pueden manipularse para obtener texturas de superficie predefinidas.
- Generar al menos tres texturas de superficie diferentes con el proceso de fresado modificado.
- Caracterizar un método de manipulación de estructuras, montaje y herramientas.
- Caracterizar la estructura obtenida y analizar el patrón geométrico obtenido.

3. Materiales y métodos

3.1. Equipos y materiales

La máquina herramienta utilizada fue un centro de maquinado vertical marca Bridgeport TORQ-CUT 22 con control Bridgeport DX-32, potencia de husillo de 5.5 kW, y frecuencia rotacional de husillo máxima de 6000 min^{-1}.

Se utilizó también una limadora SH-45C marca INFRATIREA para implementar un ensayo no estándar de tribología, esta máquina tiene un recorrido máximo del carnero de 425 mm, la mesa con un desplazamiento vertical máximo de 400 mm y un desplazamiento horizontal máximo de 480 mm.

Para la toma de imágenes de las texturas de superficie fabricadas se utilizaron un microscopio estereoscopio STEMI DV4, y un microscopio electrónico de barrido Jeol NeoScope JCM-5000.

El material de trabajo seleccionado fue bronce SAE 40, por su alta maquinabilidad, especialmente en lo referente a la facilidad de obtener buen acabado de superficie. Este material también presenta alta resistencia a la corrosión en condiciones de temperatura hasta 400°C, así como buena resistencia al desgaste y a la abrasión en aplicaciones con cargas de impacto (Li, Ngai & Xia, 1996).

3.2. Herramientas de corte

A continuación, se presentan las herramientas de corte utilizadas. A cada herramienta se le asigna un código para referirlas en las secciones siguientes.

La primera herramienta de corte seleccionada, que se identifica adelante con el código H1, fue una herramienta KENNAMETAL para torneado de roscas de referencia NK2 A12M-NN-T0L2 con un inserto de referencia NT2RKC5010 (figura 13) grado de material KCU10 apto para maquinar diversos materiales de trabajo incluidos los no ferrosos (Kennametal, 2018).

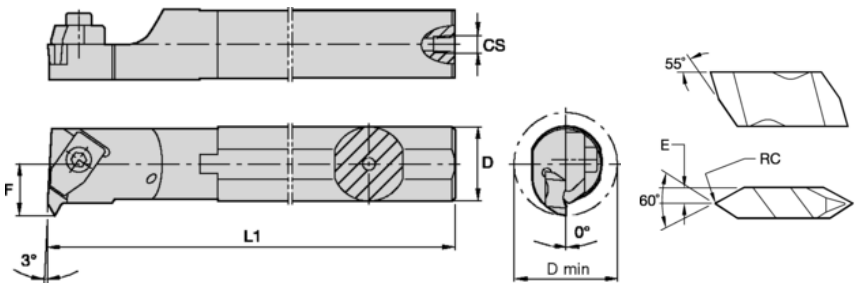


Figura 13. Herramienta de corte H1 usada normalmente para torneado de roscas (Kennametal 2018)

Para uno de los experimentos exploratorios se utilizó una herramienta de corte para fabricar colas de milano y se identifica adelante con el código H2, es una herramienta de acero rápido de seis filos de corte con un ángulo de 60° y de 24 mm de diámetro (figura 14).

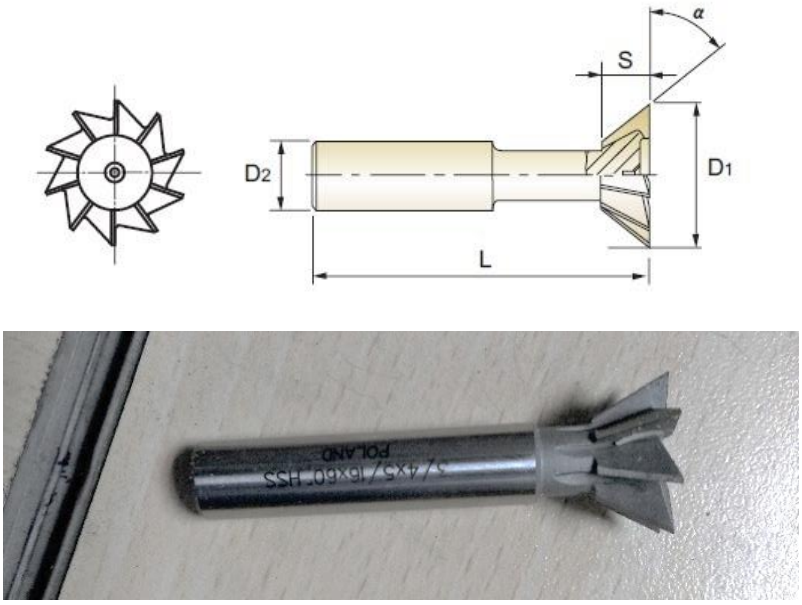


Figura 14. Herramienta de corte H2 para la realización de experimentos preliminares.

Para el otro de los experimentos exploratorios, se utilizó una fresa frontal de insertos rectos, que se identifica adelante con el código H3, de 60 mm de diámetro, de seis insertos de la referencia Mitsubishi APMT1604PDER-M2 (Figura 15.).

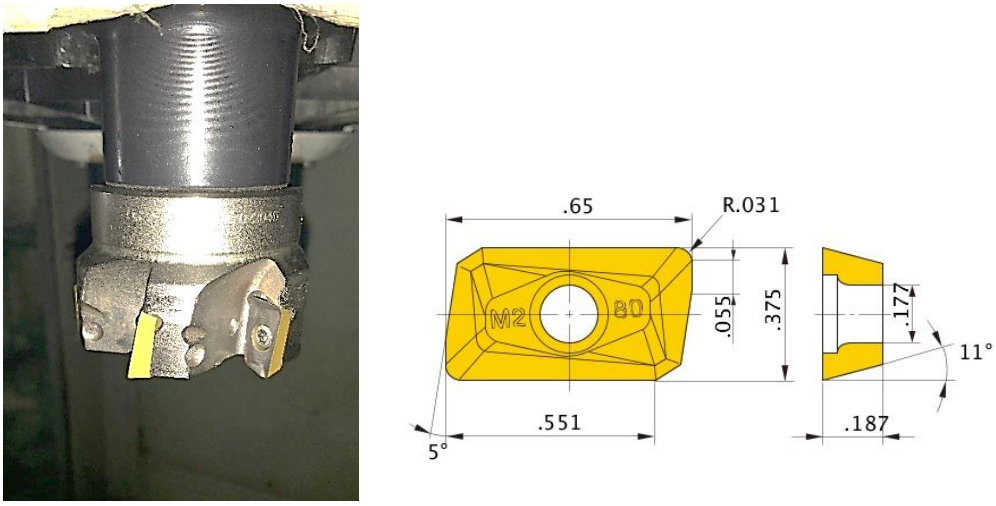


Figura 15. Herramienta de corte H3 para la realización de experimentos preliminares (Mitsubishi Materials, 2018).

3.3. Ensayo de desgaste no estándar

Con base en lo reportado por Denkena et al. (2012) quienes realizan pruebas del comportamiento tribológico de las superficies con textura, se decidió realizar un ensayo de desgaste reciprocante con los recursos disponibles, para evaluar el comportamiento de las superficies con textura producidas en aplicaciones de deslizamiento. El ensayo se implementó en la limadora mencionada en la sección 3.1.

Para el diseño del dispositivo, se requerían al menos 600 N de carga, con base en el ensayo realizado por Denkena et al., (2012), para lograrlo se usó un resorte de matricería referencia TL25X50 marca GIN que ofrece una carga máxima de 824 N, con una constante de resorte de 4.2 Kgf/mm. A partir de las dimensiones del resorte se diseñó un mecanismo de alojamiento, guía y acople de las partes (figura 16).

Para la limpieza de las probetas antes y después de cada ensayo, se utilizó una máquina de limpieza por ultrasonido BAKU BK-3550 con una potencia de 30-50 W y frecuencia de operación de 40 kHz, para medir la pérdida de masa se utilizó una balanza electrónica marca DENVER INSTRUMENT modelo SI-234 con capacidad para 230 gr, con precisión de 0.1 gr. Por último, para garantizar la distancia de deformación del resorte, se utilizó un medidor de altura digital marca Moore & Wright 190-DBL.

El objetivo del ensayo fue generar un sistema de desgaste entre dos superficies, una platina rectificada de acero 1045 y las probetas con las texturas de superficie. El dispositivo que porta la probeta a ensayar (figura 16) se monta en el carnero de la limadora mediante el tornillo habitual de sujeción del portaherramientas. Las superficies se lubricaron con 3.0 ml de aceite para guías Tellus 37.

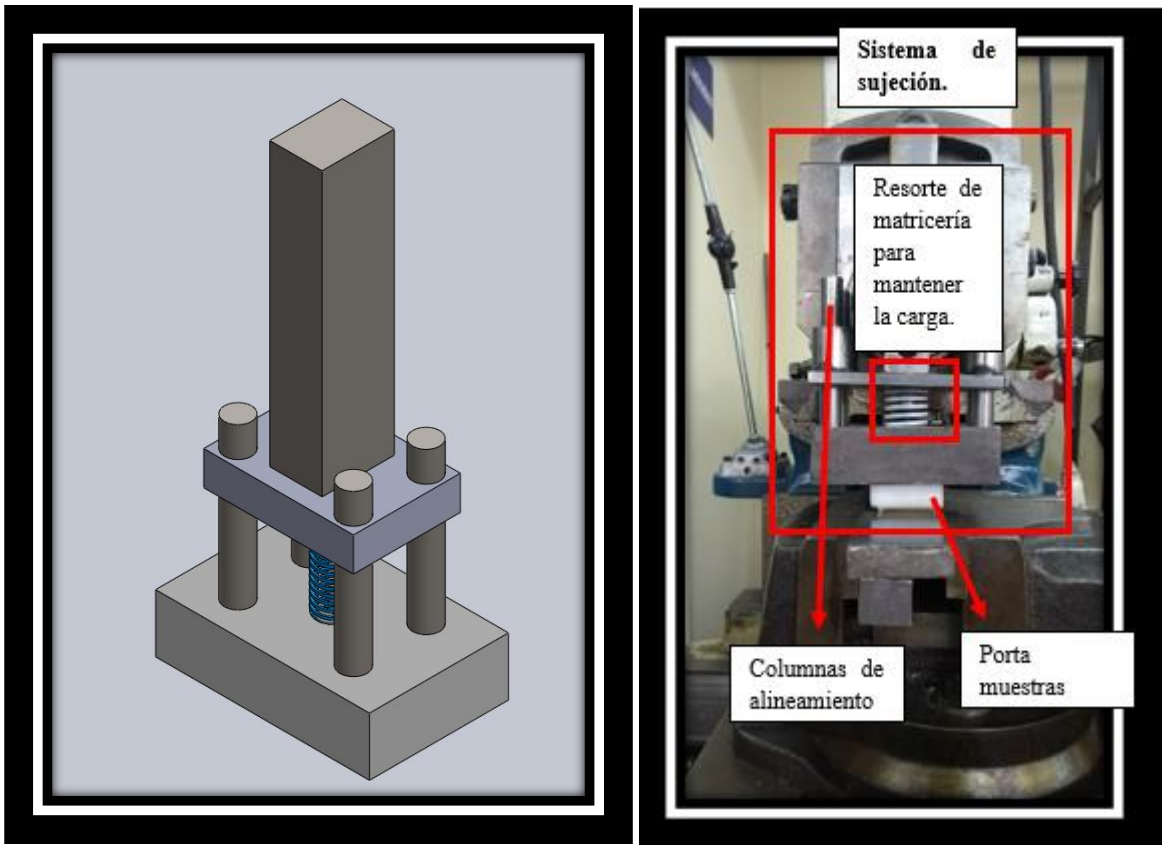


Figura 16. Mecanismo para el ensayo de desgaste.

3.4. Modelado de las superficies

Para la estrategia de maquinado seleccionada, después de los ensayos preliminares mencionados más adelante, se implementó en MatLab la simulación de la cicloide resultante de la trayectoria de la herramienta, para obtener la visión 3D de las cavidades generadas se utilizó en el software CAD SolidWorks la información de la cicloide, la geometría de la punta de la herramienta y la profundidad de corte máxima.

Para la visualización de la cicloide que describe la trayectoria de la punta de la herramienta se trabajó desde la aplicación MuPAD (ver anexo 1), en la cual se programaron como parámetros de entrada la frecuencia rotacional de la herramienta, el radio de la herramienta y el tiempo de maquinado. Una vez obtenida la nube de puntos de la cicloide correspondiente, los datos se exportaron a Excel para poder transferirlos a SolidWorks. Una vez importada la trayectoria, junto con el perfil de la punta de herramienta de corte y la profundidad de corte se obtiene el patrón de rasgos o textura que teóricamente se obtiene con el proceso. (Figura 17)

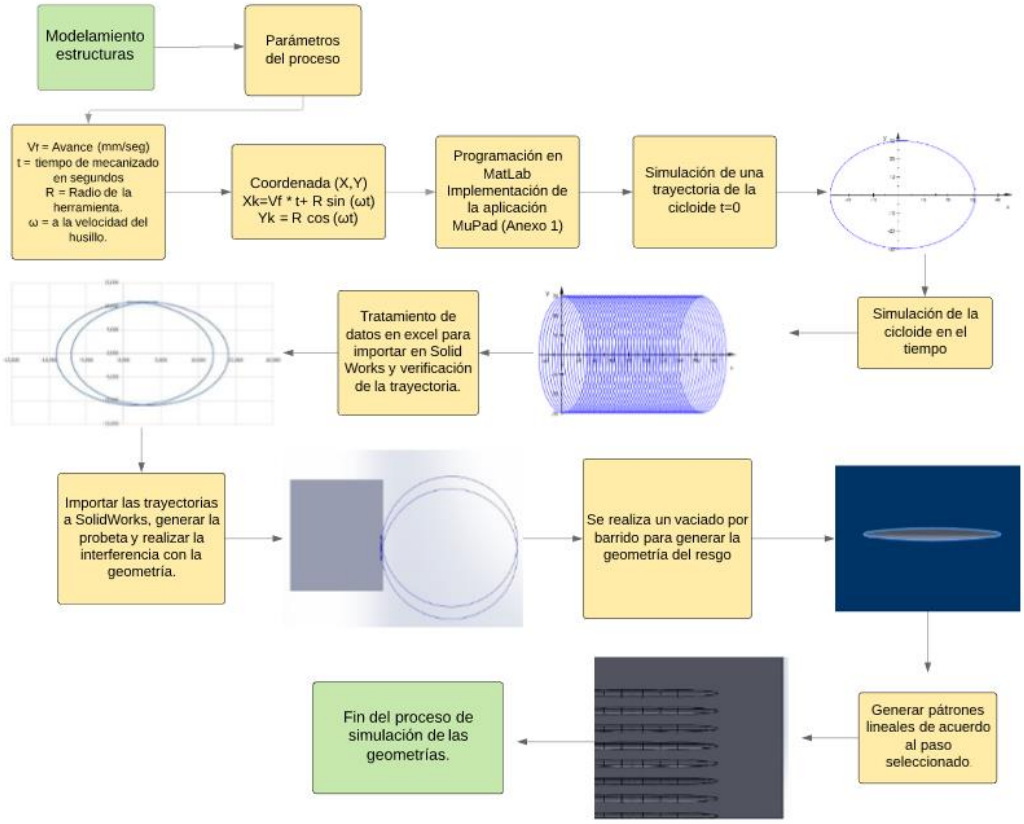


Figura 17 diagrama de flujo proceso de modelamiento de estructuras.

4. Resultados y discusión

4.1. Ensayos preliminares

Ensayo 1 – zig-zag programado en CNC

Las superficies se fabricaron sobre las caras de probetas de 32×32×32 mm en bronce SAE 40, se escogió este material debido a su buena maquinabilidad, especialmente porque permite lograr buen acabado superficial. Las dimensiones de las probetas fueron proyectadas para facilitar su manipulación y montaje. De otro lado, de acuerdo con lo reportado por Cheng et al. (2008), Denkena, Kätsner & Göttsching (2015) y Hadad & Ramenazi (2016), los parámetros de corte fundamentales para la experimentación y consecución de las estructuras de superficie son la frecuencia rotacional de la herramienta y la velocidad de avance, de esta manera, en este apartado serán referenciados dichos parámetros.

Para la primera prueba se utilizó la herramienta cola de milano (código H2 en la sección de materiales y métodos), programando trayectorias de mecanizado en el plano XY con oscilación (zig-zag) en la dirección X, como se muestra en la figura 18. El montaje y el resultado pueden apreciarse en la figura 19. Se utilizó frecuencia rotacional de 330 min^{-1} y avance de 540 mm/min obteniendo una velocidad de corte de 24.9 m/min y estableciendo una interferencia (profundidad máxima de corte) entre la trayectoria de la herramienta y la superficie de trabajo de 0.5 mm en el eje X.

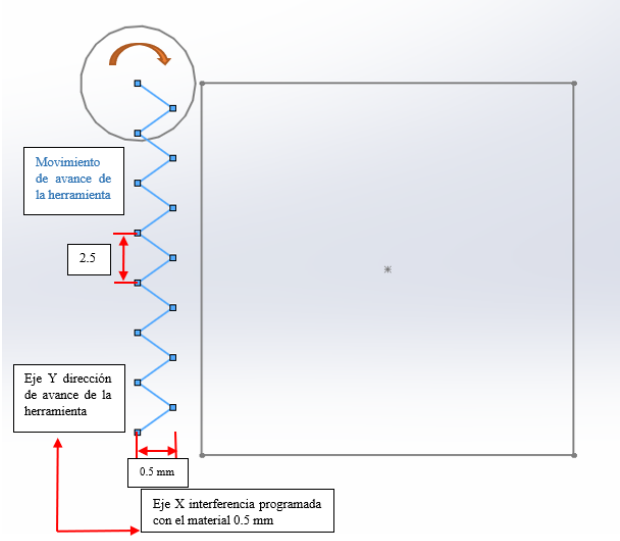


Figura 18. Esquema del movimiento de maquinado en el ensayo 1.

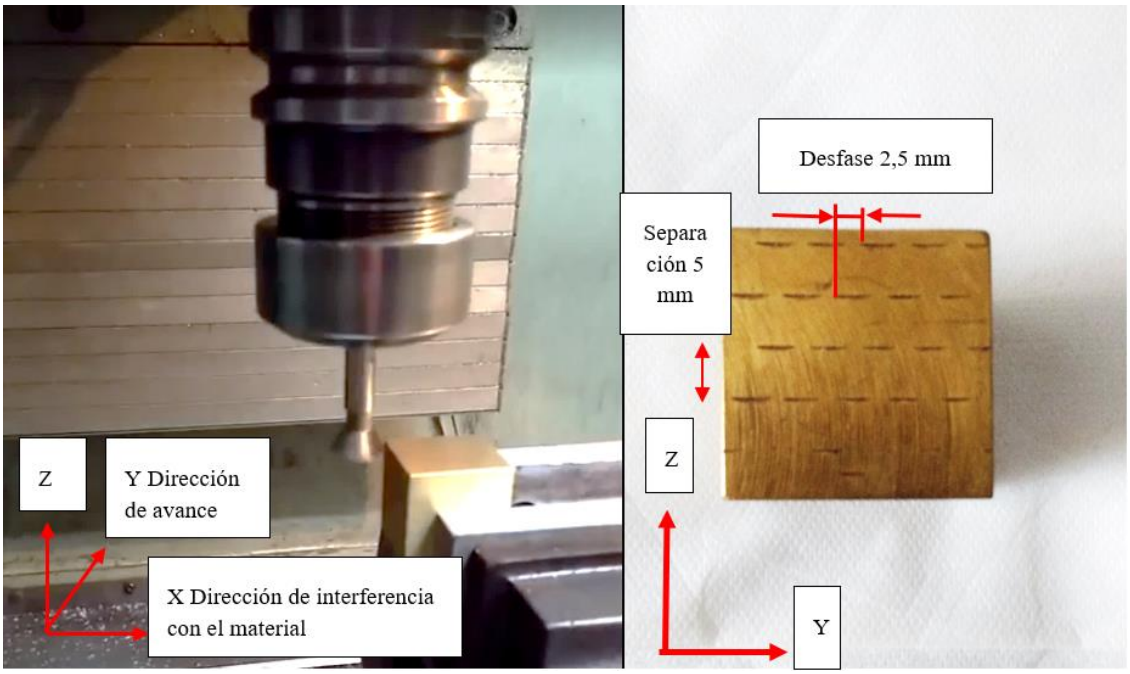


Figura 19. Ensayo 1, usando oscilación (zig-zag) por programación CNC.

Como lo programado, con el maquinado, se obtuvo un patrón lineal de cavidades longitudinales espaciadas 5.0 mm y paso en el eje Y de 2.5 mm.

Esta modalidad para generar estructuras de superficie tiene similitud con los montajes utilizando oscilación con piezoeléctricos reportados por Denkena, Kätsner & Göttsching (2015), pero esta idea fue descartada debido a que la máquina-herramienta se sometía a un régimen de trabajo dinámico para el cual no ha sido diseñada con la probabilidad de inducir daño en el husillo. Ya que, el proceso planteado simulaba el movimiento de taladrado en CNC (picoteo) lo que podría llegar a sobrecargar el sistema y en caso de algún desalineamiento o error en el montaje podría llegar a causar un daño crítico en el eje del husillo.

Ensayo 2 – fresado frontal de alto avance

Este ensayo fue un proceso de fresado frontal con alto avance. Se utilizó la fresa frontal (código H3) de 6 insertos nominales, pero el experimento se realizó dejando únicamente un inserto en el cuerpo de la herramienta. El montaje realizado se puede apreciar en la figura 20.

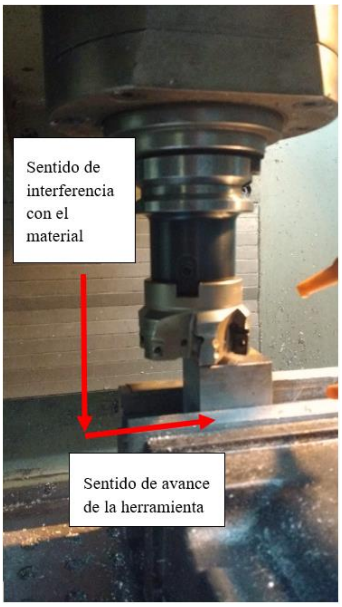


Figura 20. Ensayo 2, con fresa frontal de 60 mm y un único diente.

Los parámetros de corte utilizados fueron frecuencia rotacional de 300 min^{-1} y velocidad de avance de 1125 mm/min, obteniendo una velocidad de corte de 56,6 m/min y una interferencia con el material (profundidad de corte axial) de 0.2 mm con el eje perpendicular a la probeta maquinada. Como se observa en la figura 21 la textura generada corresponde a la trayectoria frontal y posterior de la cicloide que describe espacialmente el filo de corte de la fresa frontal. También se fabricó una superficie con dos trayectorias de avance perpendiculares emulando parcialmente lo realizado por Hadad & Ramenazi (2016), el resultado se muestra en la figura 22.

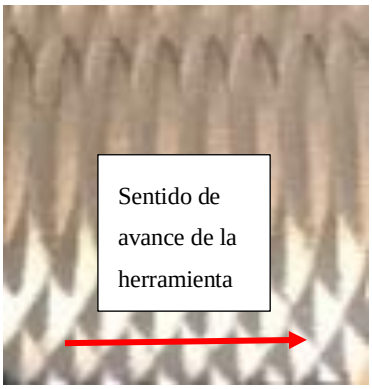


Figura 21. Ensayo 2, superficie obtenida con una pasada.

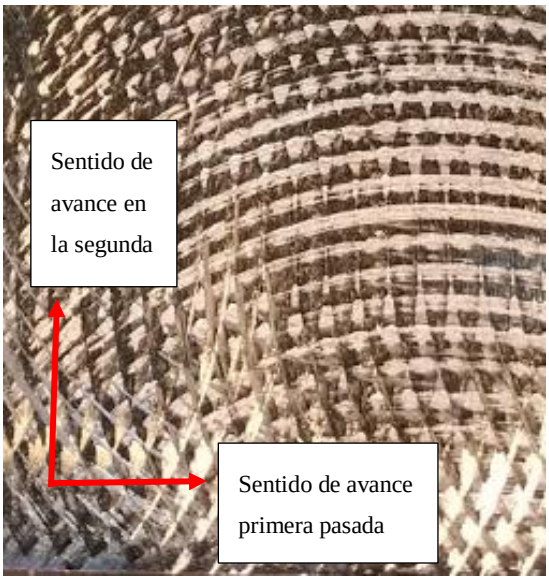


Figura 22. Ensayo 2, superficie obtenida con dos pasadas perpendiculares.

Esta modalidad fue descartada debido a que el tipo de textura que se obtiene no es homogénea para toda superficie y la máquina evidenció sobrecarga.

Ensayo 3 – fresado cilíndrico modificado

La tercera alternativa que se intentó, con los recursos disponibles, para la generación de texturas de superficie, se presenta en las figuras 23 y 24. Se utilizó una herramienta para torneado de roscas (código H1), en configuración de fresado de tipo cilíndrico, sobre la cara plana lateral de la probeta, con corte concordante, de esta manera se obtiene una geometría de rasgos longitudinales en la dirección del avance, en este caso el eje Y.

La razón de usar una herramienta para roscado es el elevado grado de calidad de su perfil geométrico. Se utilizó un inserto con radio de punta 0.1 mm con el propósito de lograr micro cavidades similares a las reportadas por: Denkena et al. (2012) quienes utilizaron herramientas con un radio de punta también de 0.1 mm.

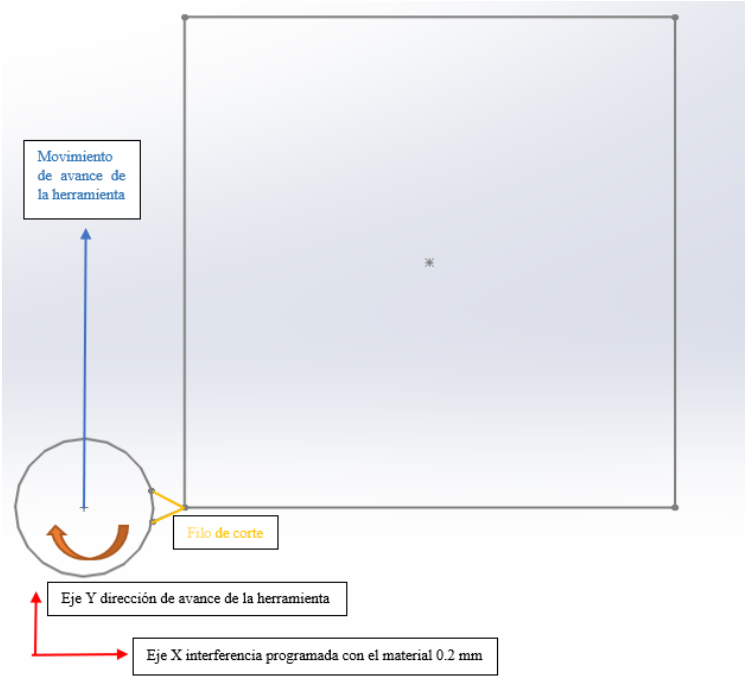


Figura 23. Cinemática del ensayo 3.

Figura 24. Ensayo 3, montaje experimental.

Se utilizaron los parámetros frecuencia rotacional, la velocidad de avance y la profundidad de corte programadas mostrados en la tabla 2. El parámetro de entrada para diseñar el proceso es el paso entre las cavidades generadas. De la recopilación bibliográfica se establecen los parámetros del ensayo inspirados en las investigaciones de Cheng et al., (2008), Ramos, Relvas & Simões (2003), Hadad & Ramenazi (2016) y Denkena et al. (2012).

Tabla 2. Parámetros experimento 3

Iteración	**Paso mm**	**Frecuencia rotacional [min $^{-1}$]**	**Velocidad de avance [mm/min]**	**Velocidad de corte [m/min]**	**Profundidad de corte programada [mm]**
1	0.25	1000	250	58.12	0.2
2	0.5	1000	500	58.12	0.2
3	2.0	500	1000	29.06	0.2
4	1.8	500	1250	31.96	0.2
5	4.0	250	1000	14.53	0.2
6	6.25	250	1250	11.62	0.2
7	0.10	1000	100	58.12	0.2

Las texturas obtenidas se pueden observar en la imagen SEM de la figura 25. Con las combinaciones de avances 1,2,3, y 7 resultaron surcos casi continuos, mientras que, con la combinación 4 se obtuvo un rasgo semicontinuo con una reducción en el tamaño del rasgo y con la combinación 5 se obtuvieron rasgos separados.

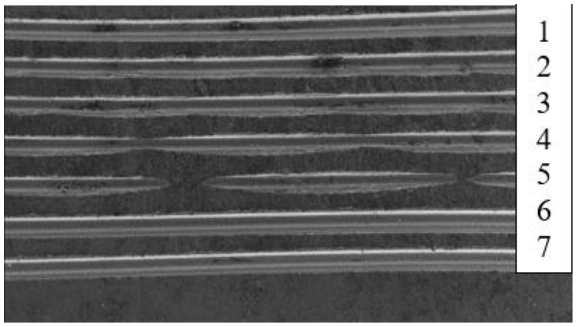
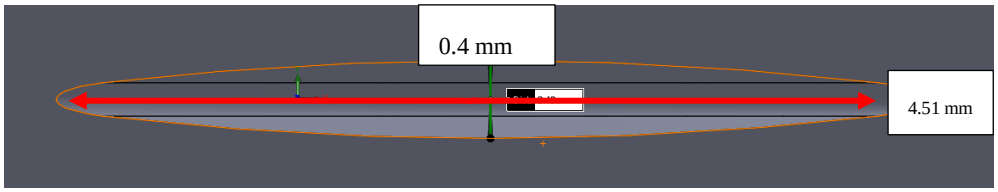


Figura 25. Desarrollo de las estructuras por mecanizado lateral.

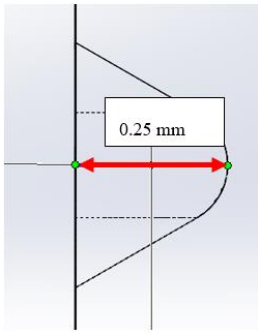
Este ensayo en particular no representa una condición de riesgo para la máquina-herramienta utilizada y permite una planificación sencilla de las posibles estructuras a lograr. Por esta razón se decidió seguir trabajando con esta alternativa para el desarrollo de la experimentación.

4.2. Modelado de la estrategia de maquinado seleccionada

Como se mencionó, la estrategia seleccionada para seguir explorando la fabricación de texturas de superficie fue la resultante del ensayo 3, usando una herramienta de corte de roscas, en fresado cilíndrico con corte concordante. Para el desarrollo del modelo cinemático el primer paso realizado fue la simulación del recorrido de cicloide de la herramienta en MATLAB, después se exportaba la información discreta de puntos de la trayectoria a una hoja de cálculo en Excel y por último se importaban dichos puntos en SolidWorks, los cuales, junto con la geometría de la pastilla de corte permitían generar el modelo de la cavidad individual o secuencia de cavidades resultante para unas condiciones de frecuencia rotacional, avance y profundidad máxima de corte dadas. Un resultado típico obtenido es presentado en la figura 2, con velocidad de avance de 1000 mm/min, frecuencia de rotación del husillo de 500 min^{-1} e interferencia máxima con el material de 0.25 mm. Las medidas obtenidas de la marca sobre el material son de 0.40 mm de ancho, y una longitud de 4.51 mm. Otra posibilidad es partir de una geometría del rasgo deseada y descubrir la frecuencia rotacional y avance apropiados.



vista superior



sección al centro

Figura 26. Modelado de una microcavidad generada en un giro de la herramienta.

En la figura 27 se muestra un caso en que las cavidades individuales generan un rasgo continuo y en la figura 28 se muestran los modelos de las texturas que se decidieron fabricar posteriormente. Las texturas seleccionadas no tienen en principio ningún uso de ingeniería especifico, el objetivo era verificar la factibilidad de fabricación de texturas con los principios y con la tecnología propuestos. Basado en la aplicación tribológica desarrollada por Denkena et al. (2012) se selecciona el tipo de rasgo que tuviera la posibilidad de contener mayor cantidad de lubricante posible. La geometría seleccionada es continua, con cambios en la altura de la marca dejada por la herramienta, con la posibilidad de a lo largo del rasgo contener lubricante.

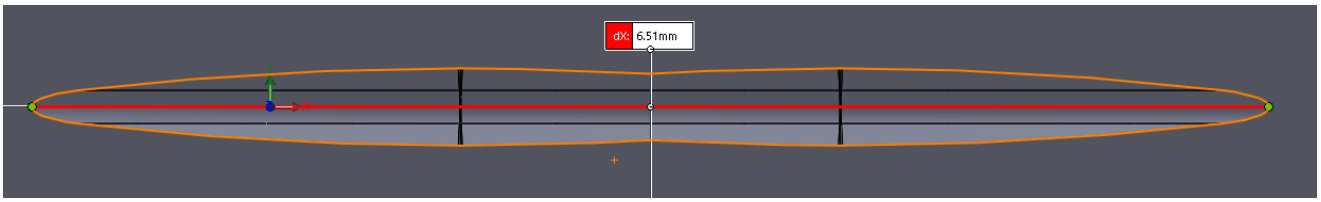
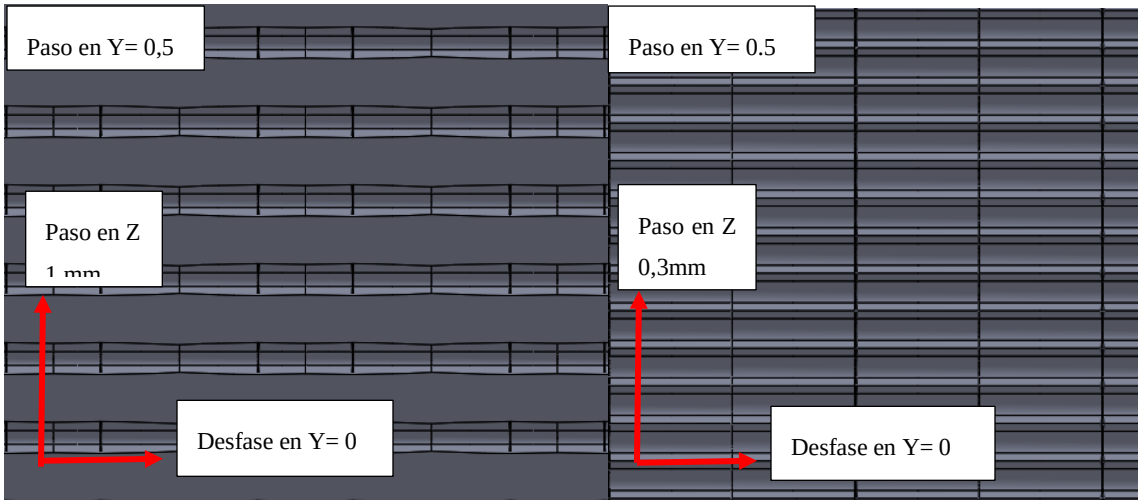
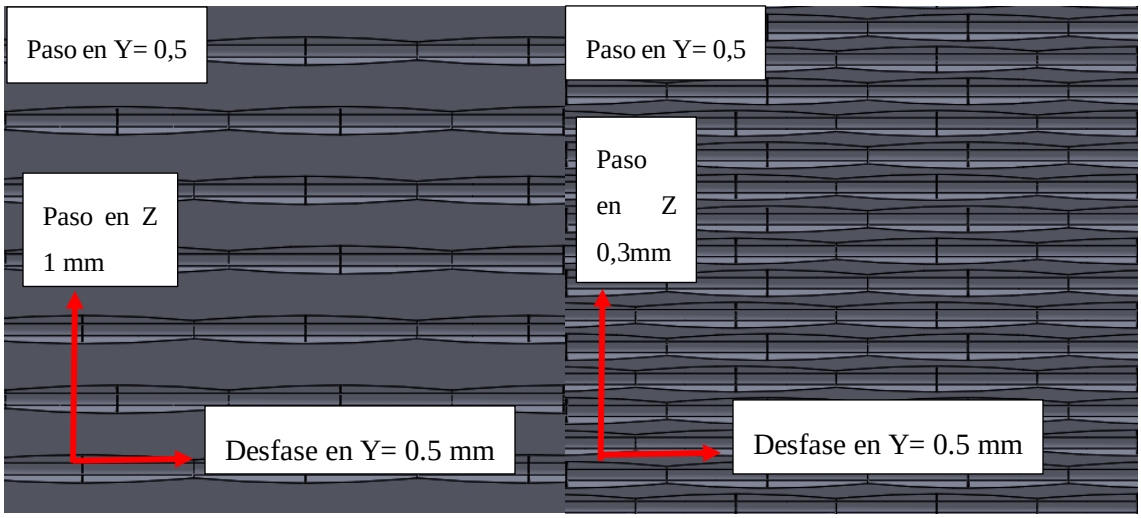


Figura 27. Modelado resultante en caso de traslape de los rasgos.



a) Tex1 b) Tex2



c) Tex3 d) Tex4

Figura 28. Modelado de las texturas seleccionadas para fabricación. velocidad de avance de 1000 mm/min, frecuencia de rotación del husillo de 500 min-1 e interferencia máxima con el material de 0.25 mm.

4.3. Fabricación y caracterización de las superficies seleccionadas

El modelo presentado ofreció una perspectiva del resultado que se debía obtener del maquinado de las probetas. Para la ejecución del proceso, se buscó establecer un parámetro que garantizara la posición angular del husillo en el mismo punto de inicio para las trayectorias de maquinado, de esta manera, se programó el comando M19 de orientación del husillo, para que la herramienta se orientase en la misma posición angular antes de cada una de las pasadas de corte sobre el material.

Una vez conocido el sistema, el alcance de este, la posibilidad y factibilidad en la fabricación, se maquinaron las texturas de superficie. Posteriormente, se compararon los resultados de la experimentación con los modelos obtenidos previamente. Para ello, se realizó un análisis de morfología de las texturas de superficie fabricadas mediante microscopia electrónica de barrido y mediante microscopia óptica.

En la figura 29 se presenta la geometría de la herramienta de roscado (código T1) que se implementó, el gráfico del sentido de avance de la herramienta (corte concordante) y el sentido en el cual se presentaba la interferencia con el material.

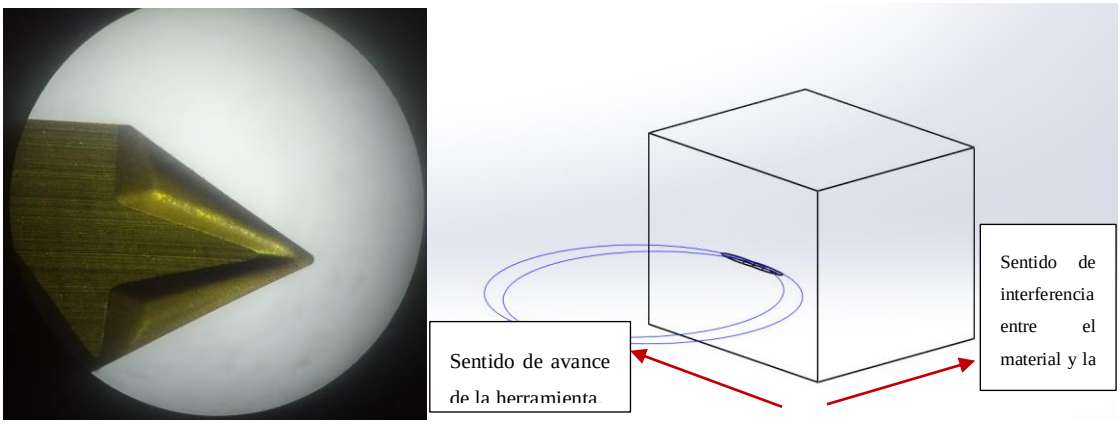


Figura 29. Montaje experimental, herramienta T1 y sentido concordante de corte.

En la figura 30 se puede observar el resultado de fabricación de la textura denominada Tex1; las marcas de inicio de cada rasgo generado por la herramienta concuerdan con la simulación. El alineamiento entre los surcos no es perfecto como se esperaba del modelado, esto se atribuye a desvíos en la posición de orientación del husillo con el comando M19.

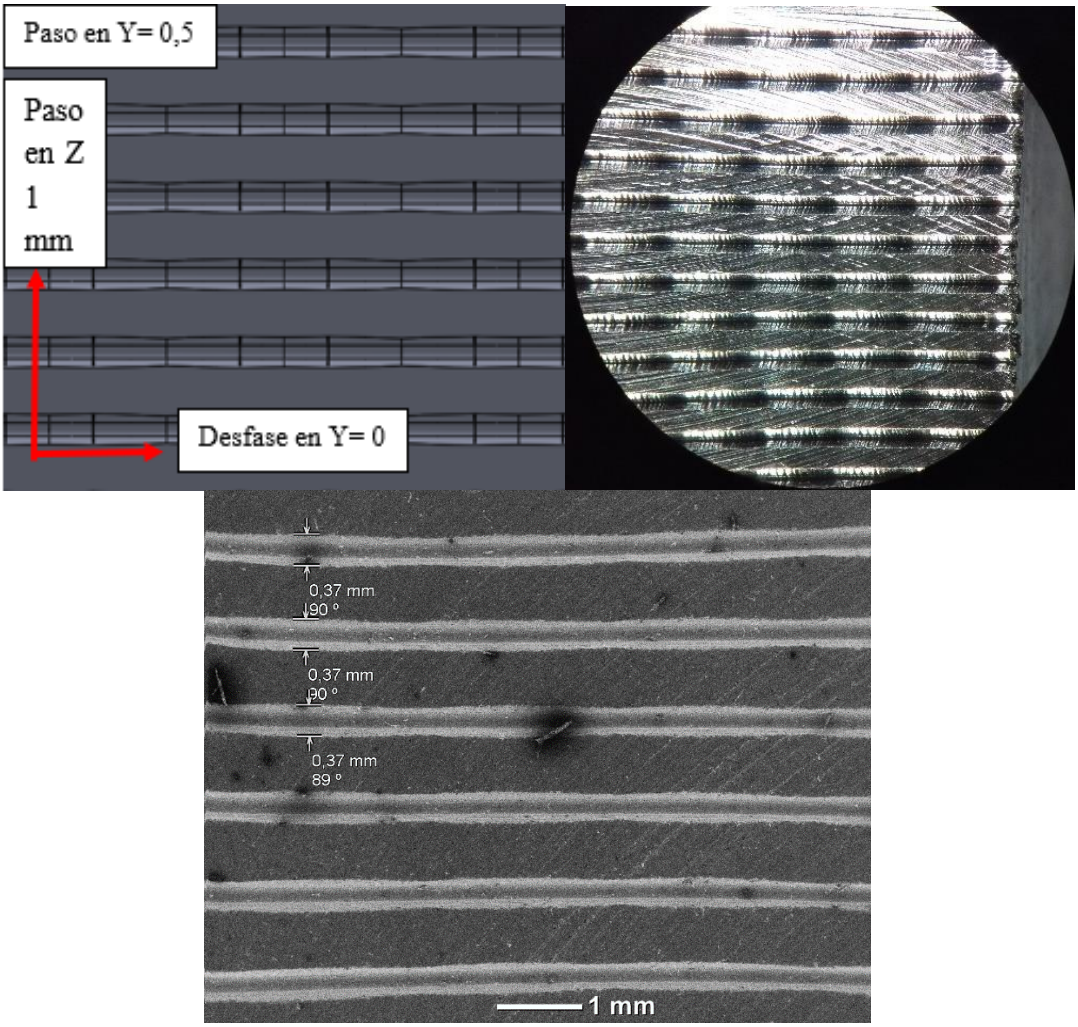


Figura 30. Resultados modelado y experimental textura Tex1.

En las imágenes de microscopía SEM y óptica se evidencian también las marcas correspondientes al maquinado de preparación de las probetas por fresado frontal de acabado.

En la figura 31 se puede observar la textura Tex2 fabricada junto con el modelo de la misma. En este caso se generó una cresta de arista aguda entre los surcos, debida a la interferencia programada de 0,3 mm entre surcos.

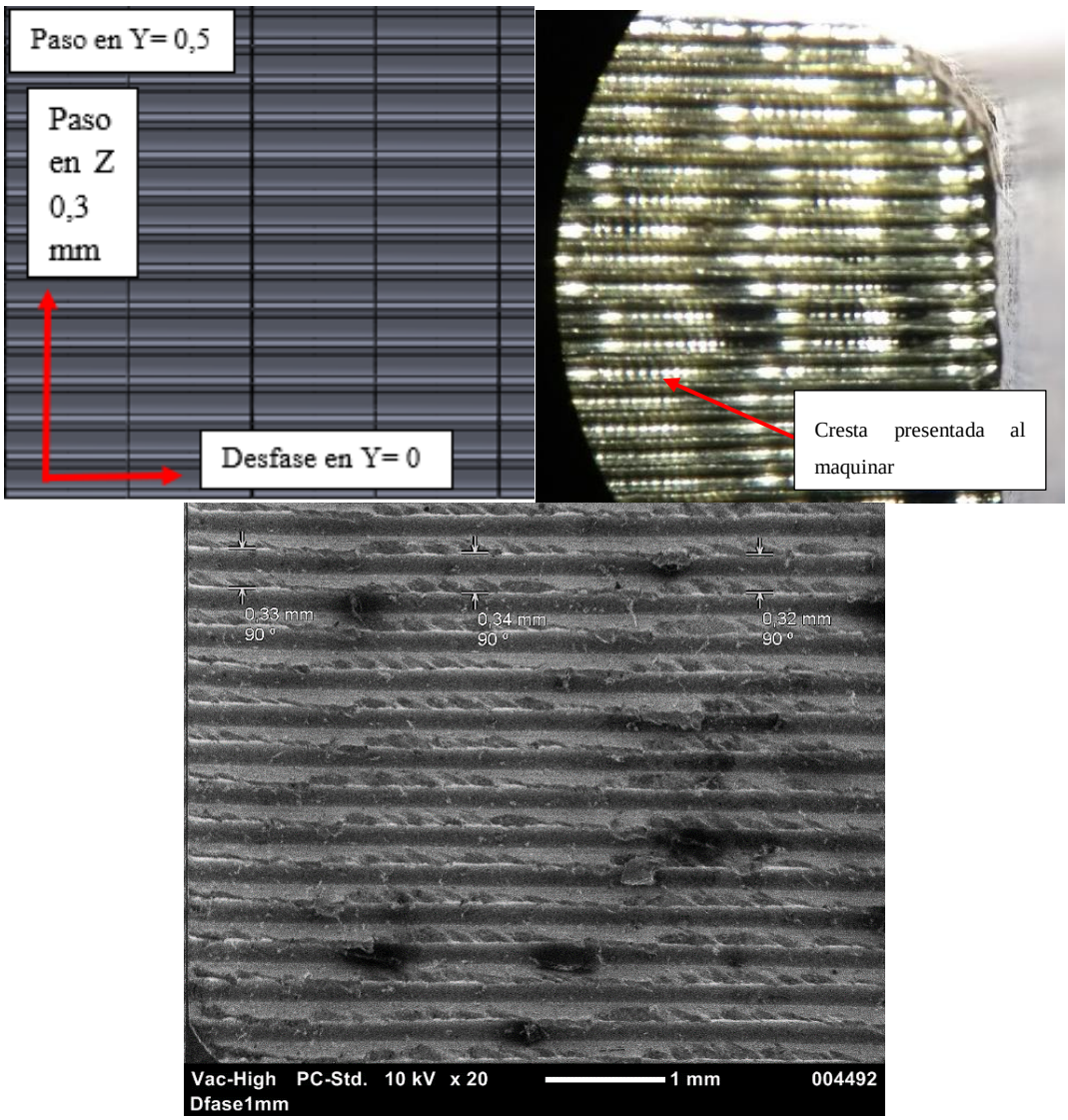


Figura 31. Resultados modelado y experimental textura Tex2.

Se puede observar que la longitud medida de los rasgos es de 1.6 mm y un ancho de 0.32 mm. Sin embargo, cabe anotar que al realizar las mediciones se presentan dificultades dado que al solaparse las trayectorias se generan aristas irregulares.

También, se hicieron evidentes marcas perpendiculares a la dirección de avance, características de la presencia de retemblado (*chatter*) en la superficie maquinada, esto se debe probablemente la vibración originada por el voladizo en el montaje del cuerpo de la herramienta de corte. Nuevamente

se observa que existe un error de posicionamiento angular del husillo originando desalineamiento entre los picos de los surcos.

En la figura 32 se presenta el resultado del maquinado de textura Tex3, como se puede observar las cavidades generadas por la herramienta presentan las características muy similares al modelo, nuevamente con desalineaciones debidas al error de posicionamiento del husillo con el comando M19.

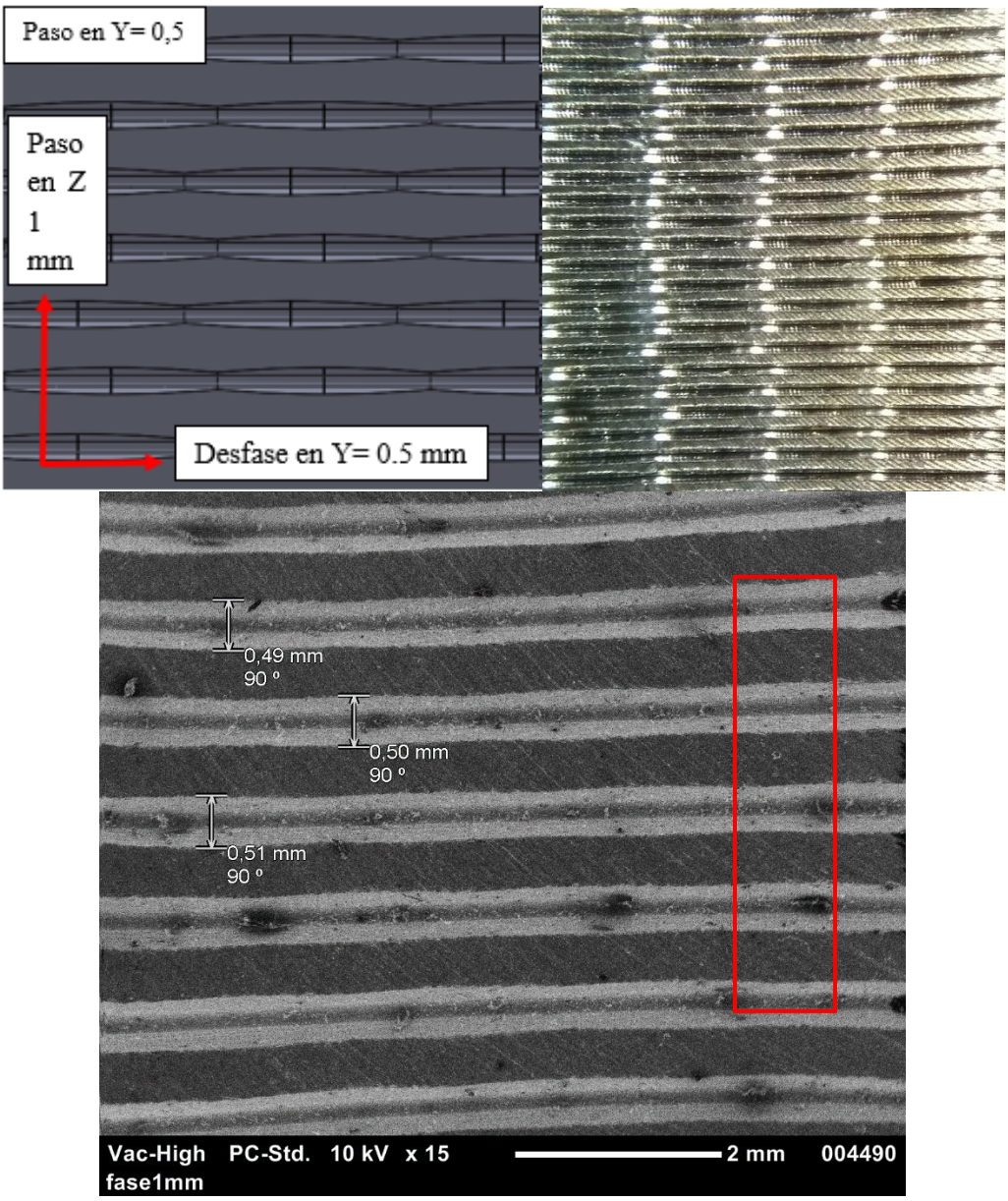


Figura 32. Resultados modelado y experimental textura Tex3.

El rasgo generado tiene ancho de 0.43 mm promedio. Según la simulación el ancho esperado era de 0.4 mm obteniendo así un desfase de 0.03 mm.

Nuevamente se observan marcas de retemblado (*chatter*) y desalineamiento, cabe anotar que la herramienta de roscado interno usada, no está expresamente diseñada para utilizarse en régimen de rotación.

Por último, se presenta en la figura 33 el resultado del maquinado de la textura Tex4 obteniendo, al igual que en la simulación, crestas con aristas agudas generadas por el traslape programado de 0.3 mm entre las hileras de cavidades.

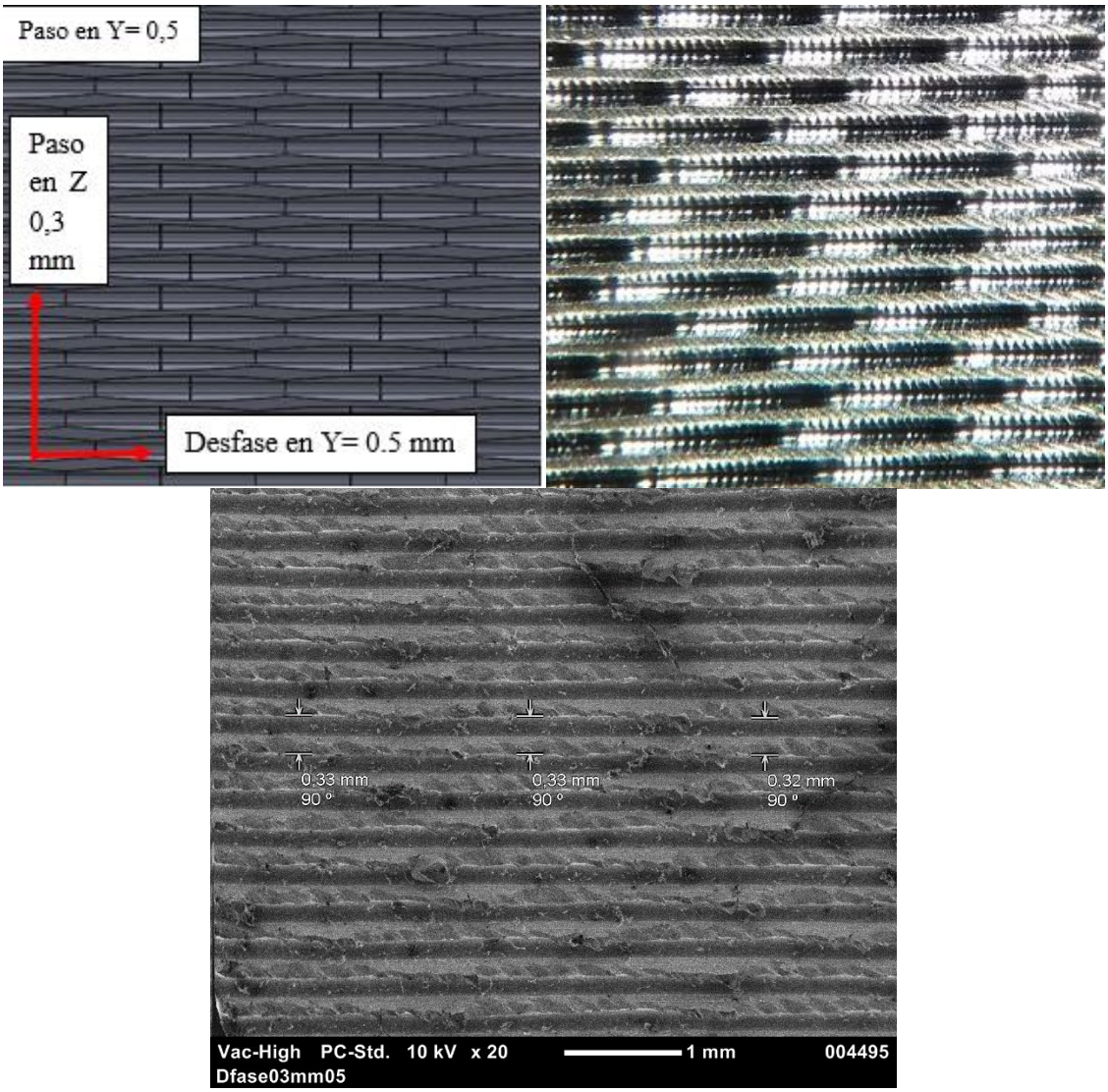


Figura 33. Resultados modelado y experimental textura Tex4.

Aunque se evidenció nuevamente retemblado; con los resultados obtenidos mediante el proceso de maquinado comparados con los modelos generados se puede concluir que se pueden obtener las texturas predeterminadas mediante los parámetros establecidos.

Dado que, el alcance de la investigación implicaba el desarrollo de texturas de superficie, se desestimaron los factores asociados a la presencia o ausencia de fluido de corte, así como el desgaste acumulado de la arista de corte, mediante el uso de aristas nuevas para cada ensayo.

Para la evaluación del rasgo se utilizó el ancho máximo del rasgo como criterio de comparación con la simulación. Se implementa un análisis de medias en el cual las hipótesis eran: 1) la medida del ancho del rasgo es igual al simulado y 2) la medida del rasgo es igual a la medida simulada. (anexo 2). De estos resultados se puede concluir que los factores asociados a la fabricación de la geometría como el alineamiento, la longitud del porta herramienta y la herramienta y el chatter asociado al proceso afectan las medidas de la marca maquinada. El error experimental es de 6.875%.

4.4. Resultados ensayo de desgaste

Una vez fabricadas las texturas de superficie, se propuso adicionalmente a los objetivos de la investigación, verificar su desempeño en aplicaciones de deslizamiento en donde la textura potencialmente serviría como reservorio del lubricante inspirados en lo reportado por (Denkena et al. 2012), utilizado como criterio de evaluación la pérdida de masa de las probetas en un ensayo reciprocante de desgaste no estándar.

Para el ensayo se realizó el montaje con el dispositivo descrito en la sección materiales y métodos. En la figura 34, se puede observar el montaje, la ubicación de la probeta maquinada, la dirección de aplicación de la carga y el sentido de deslizamiento.

Las probetas, fueron fabricadas en bronce SAE 40, de 32×32×32 mm y para el ensayo se alojaron en un dispositivo fabricado en Polietileno EMPACK para evitar que los movimientos asociados al ensayo generarán desgaste en la probeta, afectando la medición de perdida de material.

Se realizaron ensayos preliminares con duraciones entre 30 y 40 minutos y con ciclos de 14 y 105 ciclos/minuto, en la primera iteración realizada se pretende evitar algún tipo de daño en el sistema motriz de la máquina herramienta seleccionada para el ensayo el recorrido es de 300 milímetros que es la longitud de la prensa. Se lubrica el sistema con aceite para guías tellus 37. Al obtener el primer resultado sin generar ninguna afectación en la máquina se decide incrementar la frecuencia a 105

ciclos por minuto. La idea era obtener una tasa de desgaste relativamente alta para realizar un ensayo rápido de desgaste, los parámetros finalmente seleccionados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del ensayo de desgaste.

Tiempo del ensayo	35 minutos
Longitud del recorrido	150 mm
Frecuencia – velocidad máxima	105 ciclos/min - 30 m/min
Carga (definida por la deformación controlada del resorte)	600 N

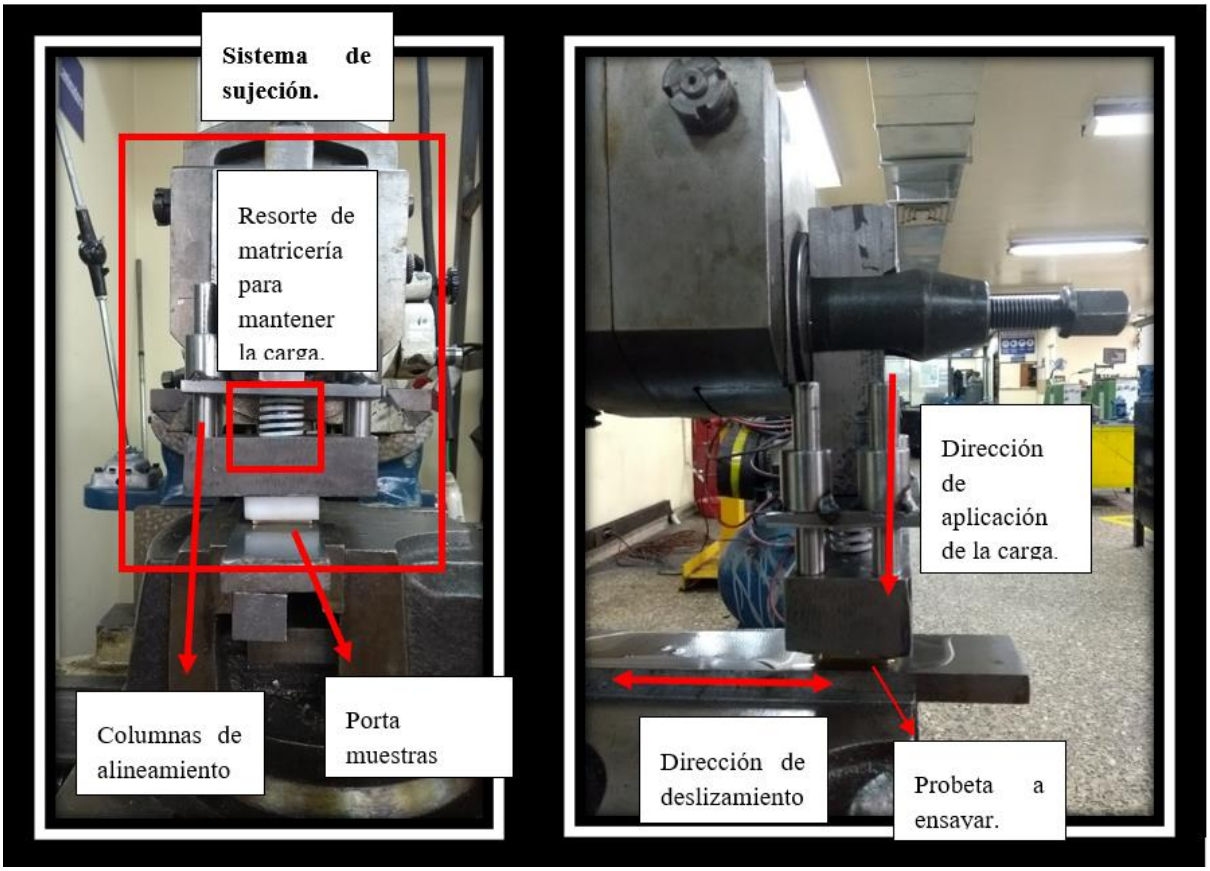


Figura 34. Montaje experimental para el ensayo de desgaste reciprocante.

Las probetas fueron meticulosamente lavadas en baño de acetona con ultrasonido antes y después del experimento. La pérdida de material se evaluó utilizando la balanza de precisión marca DENVER INSTRUMENT modelo SI-234 descrita en la sección de materiales y métodos. Para cada uno de los cuatro tipos de superficies con textura fabricadas, se realizaron tres replicas, que eran el número máximo posible con los recursos disponibles.

Se decidió realizar los ensayos en dirección perpendicular a las texturas, con base en los hallazgos de Denkena et al. (2012) quienes decidieron también realizar sus ensayos en dirección perpendicular a las texturas que fabricaron, dado que en esta dirección obtuvieron menores coeficientes de fricción.

En los ensayos se comparó la perdida de material entre los cuatro tipos de superficies con textura fabricadas y una superficie control obtenida mediante fresado frontal de acabado convencional. En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos. Para el análisis estadístico se implementa el software SPSS.

Tabla 4. Pérdida de masa [mg] en los ensayos de desgaste.

Tratamiento/Iteración	1	2	3	Promedio
Tex4	637,9	813,6	77,6	509,7
Tex3	16,9	166,2	301,0	161,4
Tex2	454,7	90,4	424,4	323,2
Tex1	197,8	240,9	259,8	232,8
Control	32,1	28,5	431,3	163,9

Para la validación del modelo experimental se verifica la normalidad de los datos mediante el método Kolmogorov-Smirnov (anexo 3). Una vez se comprueba que no es una distribución normal se realiza la prueba de Kruskal-Wallis con una significancia de 5% (anexo 4) en la cual se comprobará si la textura tiene influencia o no en el desgaste presentado después de la prueba. Del análisis estadístico se obtiene un valor P= 0.493 por la cual se establece que la geometría maquinada en las probetas si tiene influencia en el desgaste de estas. La correlación entre ensayos es determinada a partir de la prueba de Wilcoxon (anexo 5) establecida con una significancia de 5% y se comprobará si la textura

maquinada no tiene relación con la pérdida de masa de la probeta y la hipótesis alterna indica que la textura si tiene relación con la pérdida de masa. Del análisis estadístico se obtiene un valor P= 0.001 lo que indica que la textura si tiene relación con la pérdida de masa en las probetas.

En la figura 35 se presentan las superficies desgastadas, se puede observar que los patrones de desgaste no son homogéneos, y que existen zonas con mayor desgaste. Lo anterior es posiblemente debido a las condiciones apenas aceptables de alineamiento y restricción de movimiento perpendicularmente a la superficie ensayada. En las diferentes texturas se puede apreciar desgaste adhesivo-abrasivo, se pueden observar rayas en el sentido de deslizamiento del sistema, lo cual puede ser a causa de una baja lubricación. En las cavidades de la geometría hay material contenido lo que puede hacer referencia al desgaste abrasivo presentado; por otro lado, coloraciones rojizas y azulosas en las texturas (Tex3 y Tex4) refuerzan la hipótesis del desgaste adhesivo. Esto se debe a un efecto de rápido desgaste de las crestas agudas que presentan estas superficies. Así mismo la conexión entre los surcos maquinados pudo haber generado un desplazamiento del lubricante hacia los costados agravando la situación de desgaste.

Los resultados no permiten inferir una real ventaja de las estructuras fabricadas como reservorio de lubricante en aplicaciones relacionadas; por el contrario, al parecer la superficie control tiene un mejor desempeño tribológico con presencia de desgaste abrasivo. En todo caso, las superficies con textura pueden ser de interés para esta y otras aplicaciones y con el presente trabajo se ha demostrado la factibilidad de fabricar texturas sobre áreas planas extensas y utilizando tecnología convencional de maquinado.

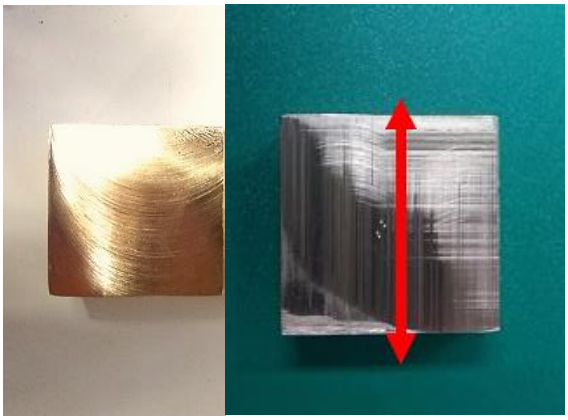


Figura 35. Resultados experimento exploratorio de desgaste.

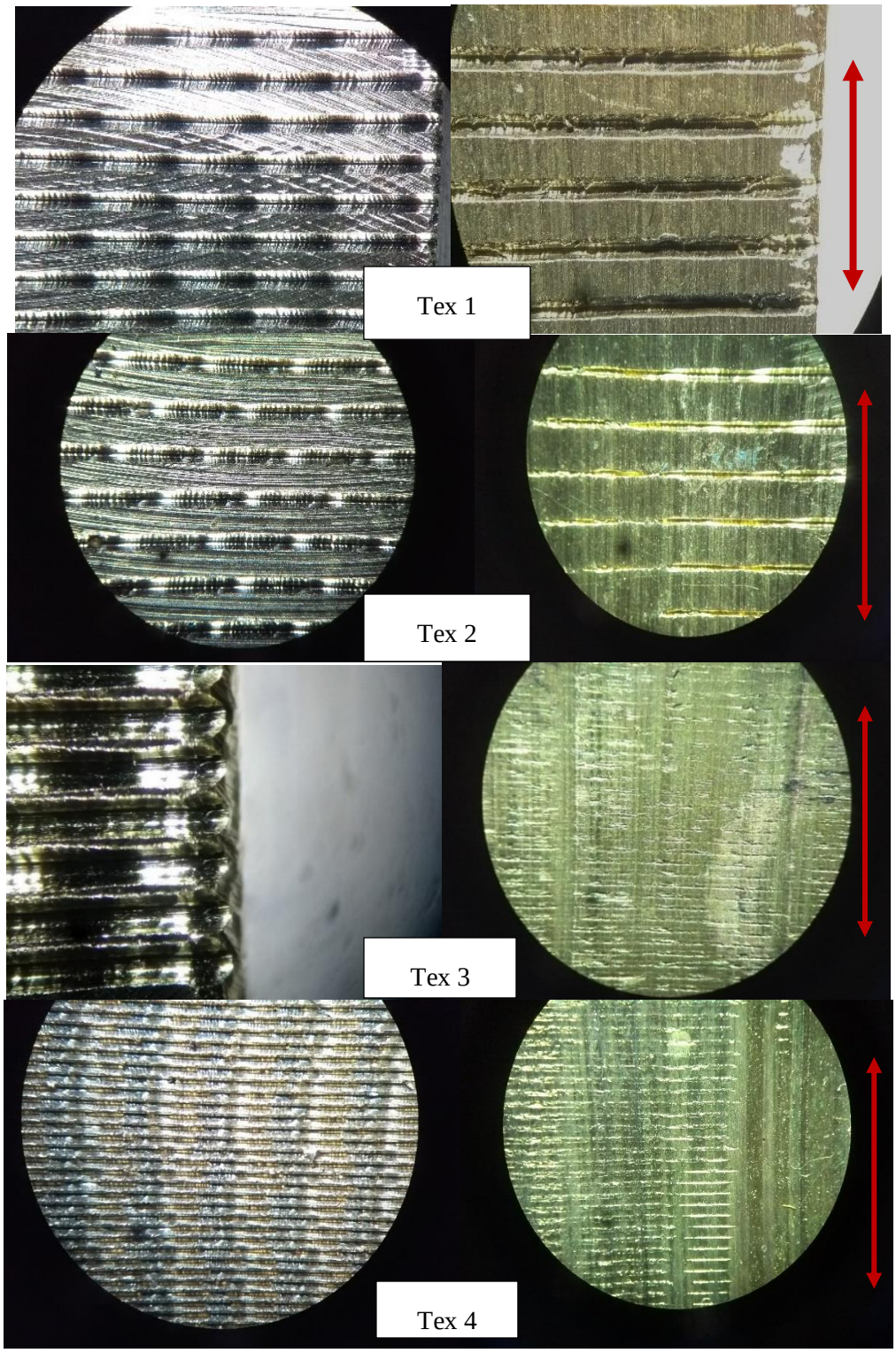


Figura 36. Resultados experimento exploratorio de desgaste. (continuación)

Una vez obtenidos los datos del análisis estadístico (Kruskal-Wallis y pruebas pareadas de Wilkoxon) se puede determinar que la geometría maquinada sobre la probeta influye en el desgaste de la superficie, por otro lado, el desgaste abrasivo presentado en las probetas (Tex3 y Tex4) permite inferir que la poca separación entre rasgos aumenta al gradiente de desgaste en las mismas. Revisando los desarrollos de Denkena et al. (2012), se deja propuesto como trabajo a futuro la fabricación de superficies con textura similares a las propuestas por estos autores, teniendo en cuenta la separación entre marcas y la disposición de estas, pero implementando el proceso de fabricación de bajo costo concebido en el presente trabajo (figura 36).

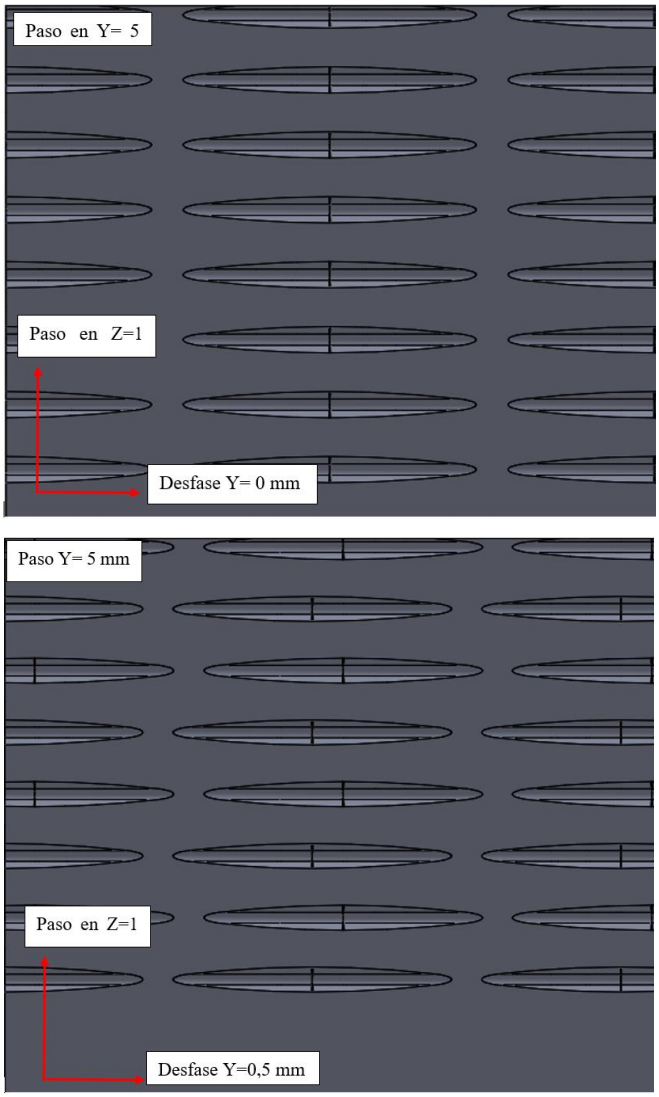


Figura 37. Propuesta de texturas como trabajo futuro.

Por otro lado, y dado el alcance de la investigación como trabajos a futuro, se puede llegar a evaluar los criterios en diferentes aplicaciones descritas por Bruzzone, Costa, Lonardo & Lucca (2008) entre las que se encuentra transferencia de calor, bioingeniería, triboligía entre otros. Así mismo, dicha estructura puede llegar a ser evaluada en diferentes regímenes de lubricación como lo reportado por Gachot, Rosenkranz, Hsu & Costa (2017); analizando el comportamiento de estructuras superficiales en lubricación hidrodinámica y elasto-hidrodinámica de película completa, baja y alta presión; régimen de lubricación mixta; régimen de lubricación límite e incluso régimen "seco" (uso de lubricantes sólidos o recubrimientos protectores). De igual manera, caracterizar las propiedades mediante simulación de elementos finitos del comportamiento hidrostático del lubricante en deslizamiento como lo reportado por Gropper, Wang & Harvey (2016), pudiendo evaluar mediante la herramienta de modelamiento desarrollada en este trabajo de tesis, rasgos con diferentes geometrías y caracterizar el comportamiento tribológico de las mismas.

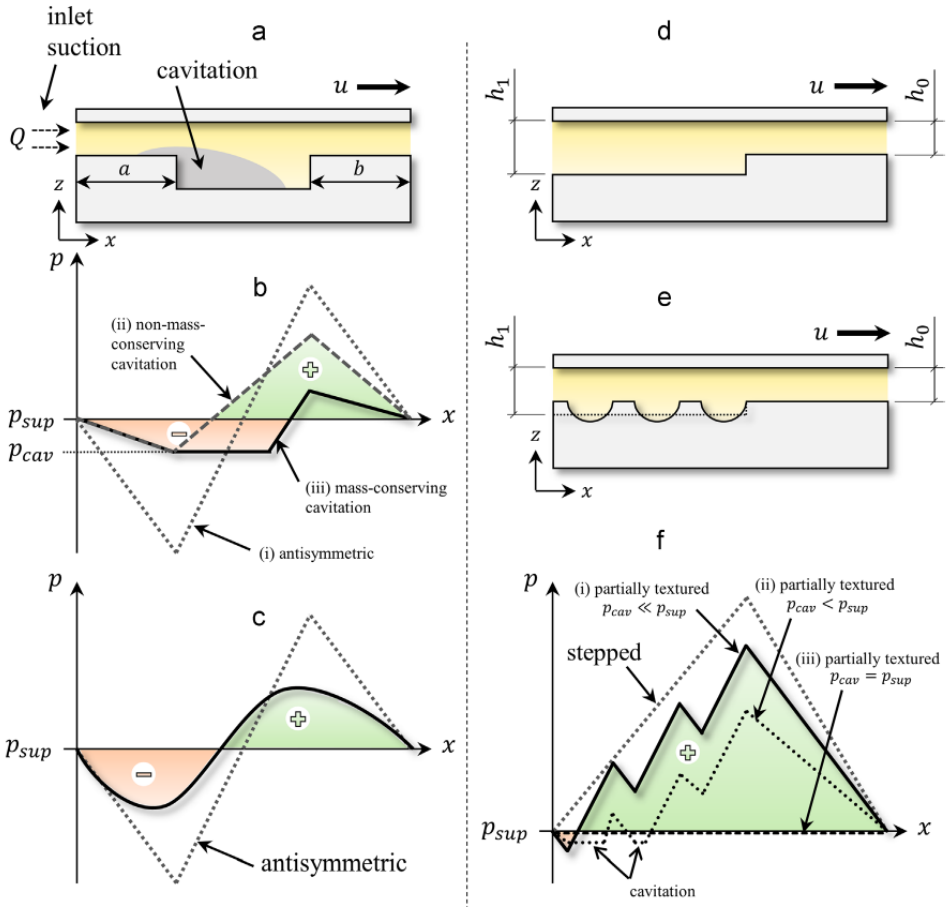


Figura 38. Evaluación del comportamiento tribológico de estructuras de superficie. Grooper, Wang & Harvey (2016)

Otro contexto por evaluar son los factores de las dimensiones máximas y mínimas que se pueden llegar a alcanzar y sus posibles usos. Una vez determinadas las posibles implementaciones de las estructuras se puede llegar a establecer la relación de “éxito” de la estructura según lo reportado por Gachot, Rosenkranz, Hsu & Costa (2017) donde se establece que uno de los criterios tiene que ver con la relación costo uso.

5. Conclusión

En este trabajo exploratorio, se probaron tres variantes del proceso de fresado convencional para fabricar estructuras de superficie. Finalmente se decidió utilizar una variante del fresado cilíndrico convencional, usando la herramienta de maquinado de roscas para la generación de las texturas de superficie; los parámetros más importantes en el desarrollo de las texturas con el método seleccionado son la frecuencia rotacional y la velocidad de avance, que en ultimas definen el paso de la cicloide descrita por la herramienta de corte. La sección geométrica de las cavidades depende a su vez de la geometría de la herramienta de corte en el plano de referencia. Otras dos variables que permiten generar diferentes patrones de texturas son el desfase entre hileras de cavidades, así como la distancia entre hileras.

En los experimentos realizados se presentó retemblado (*chatter*) en todos los casos, debido esencialmente al uso de una herramienta para torneado de roscas, no diseñada para usarse en rotación y también con un voladizo relativamente alto de la herramienta ensamblada al portaherramienta. A futuro es recomendable continuar la experimentación usando herramientas de mandrinado de precisión.

La modalidad de fabricación de texturas ensayada es fácil de modelar y permite obtener varios tipos de texturas, manipulando esencialmente la profundidad de corte, La frecuencia rotacional, el avance, el punto de inicio de cada hilera y la separación entre hileras de cavidades.

Con el método propuesto se podrían fabricar texturas con profundidades menores a las ensayadas y con cada cavidad separada de las demás para avanzar en la posibilidad del uso en aplicaciones en que se requiere retención de lubricante. De igual manera las superficies con textura generadas pueden ser motivo de investigación para otro tipo de aplicaciones. Con el trabajo desarrollado se comprobó la factibilidad para el maquinado de texturas sobre áreas planas extensas, haciendo uso de tecnología convencional.

Para el proceso inicial de desarrollo de las estructuras la experimentación jugó un papel determinante en la selección de las herramientas a utilizar, sin embargo, la experiencia mostró que con métodos matemáticos gráficos es posible determinar la combinación más apropiada de parámetros de corte para la generación de las texturas. El tener un modelo permite mejorar los criterios de selección de los parámetros de corte y tomar decisiones de diseño acerca de las diferentes geometrías de texturas de superficie que se pueden generar con una tecnología particular.

Se pudo concluir que las estructuras seleccionadas no generan una mejora en el desgaste de las probetas, que por el contrario, influyen en la pérdida de masa de las mismas; tener un rasgo continuo conllevo problemas para retener el lubricante en la geometría establecida, así mismo, la poca separación entre los rasgos aumentaba la tasa de desgaste, pues, al generar la presión en el sistema las crestas que se generaban se deformaban y al realizar el ensayo de desgaste, influían en un aumento del desgaste abrasivo al igual que en la probeta de control.

6. Referencias

Antoszewsk, B., & Tarelnik, V. (2014). Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*, 301-307.

Bordatchev, E. V. (2014). Advanced measurement and analysis of surface textures produced by micro-machining processes. *Measurement Science and Technology*, 1-14.

Bruzzone, A., Costa, H., Lonardo, P., & Lucca, D. (2008). Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 750-769.

Cardoso, P. (2012). A BRIEF REVIEW ON MICROMACHINING OF MATERIALS. *Rev. Adv. Mater*, 98-102.

Cheng, M., Cheung, C., Lee, W., To, S., & Kong, L. (2008). Theoretical and experimental analysis of nano-surface generation in ultra-precision raster milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1090-1102.

De Chiffrel, L. (2003). Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology. *Technical University of Denmark, Denmark, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany,*.

Denkena, B. (2010). Advanced microstructures and its production through cutting and grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 67-72.

Denkena, B. (2015). En B. Denkena, *Microestrcuturing of thermo-Mechanically Highly Stressed Surfaces / Microstructuring by means of cutting processes* (pág. 170). Hannover: Springer.

Denkena, J. K. (2012). Efficient Machining of Microdimples for Friction Reduction. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 1-8.

Evans, C. J. (1999). " Structured "Textured 'I or " Engineered " Surf aces. *Annals of the ClRP* , 541-556.

Gachot, C., Rosenkranz, A., Hsu, S., & Costa, H. (2017). A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*, 21-41.

Grooper, D., Wang, L., & Harvey, T. (2016). Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *TribologyInternational*, 509-529.

Grzesik, W. (2015). Characterization of surface textures generated on hardened steel parts in high-precision machining operations. *Int J Adv Manuf Technol*, 2049–2056.

Hadad, M., & Ramezani, M. (2016). Modeling and analysis of a novel approachin machining and structuring of flat surfaces using face milling process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 32-44.

Jiao, F., Sayad Saravi, S., & Cheng, K. (2016). Investigation on an integrated approach to design and micro fly-cutting of micro-structured riblet surfaces. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1-10.

kennametal. (20 de 01 de 2018). *Kennametal*. Obtenido de https://www.kennametal.com/es/products/20478624/62318451/56148232/56148278/56148748/100003232.html?orderNumber=1796049

Khalid Hafiz, A., Bordatchev, E., & Tutunea-Fatan, R. (2012). Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 425-434.

Li, Y., Ngai, T. L., & Xia, W. (1996). Mechanical, friction and wear behaviors of a novel high-strength wear-resisting aluminum bronze. *Wear*, 130-136.

Lv, Y., Wang, L., Han, Y., Xu, X., & Lu, W. (2015). Investigation of microstructure and mechanical properties of hot worked NiAl bronze alloy with different deformation degree. *Materials Science & Engineering A*, 17-24.

Matsumura, T. (2014). Micro dimple milling for structured surface. *Advanced Materials Research*, 142-151.

Motoyoshi Hasegawa, J. L. (1996). Calculation of the fractal dimensions of machined surface profiles. *Wear*, 40-45.

Ramos, A., Relvas, C., & Simoes, J. (2003). The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 209-216.

Ryk, G., Kligerman, Y., & Etsion, I. (2002). Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive components. *Tribology Transactions*, 444-449.

S J Zhang, S. T. (2016). A reviewof fly cutting applied to surface generation inultra-precision. *InternationalJournalofMachineTools&Manufacture*, 13-27.

Wang, Q. (2013). Encyclopedia of Tribology. New York: Springer Science+Business Media.

Whitehouse, D. J. (1997). Surface metrology. *Department of Engineering, University of Warwick, Coventry*, 955-972.

Xu, S. (2014). Fabrication of hybrid micro/nano-textured surfaces using rotary ultrasonic machining with one-point diamond tool. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 12-17.

Yan, J. (2010). Fabricating micro-structured surface by using single-crystalline diamond endmill. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 957–964.

Zhang, G., & Guo, C. (2015). Modeling of Cutting Force Distribution on Tool Edge in Turning Process. *Procedia Manufacturing, 1*, 454-465.

Zhang, S. (2016). A review of fly cutting applied to surface generation inultra-precision. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 13-27.

Zhanwen, S., Suet, T., & Shaojian, Z. (2018). A novel ductile machining model of single-crystal silicon for freeform surfaces with large azimuthal height variation by ultra-precision fly cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1-30.

Zhu, Z. (2015). Theoretical and experimental investigation on the novel end-fly-cutting-servo diamond machining of hierarchical micro-nanostructures. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1-40.

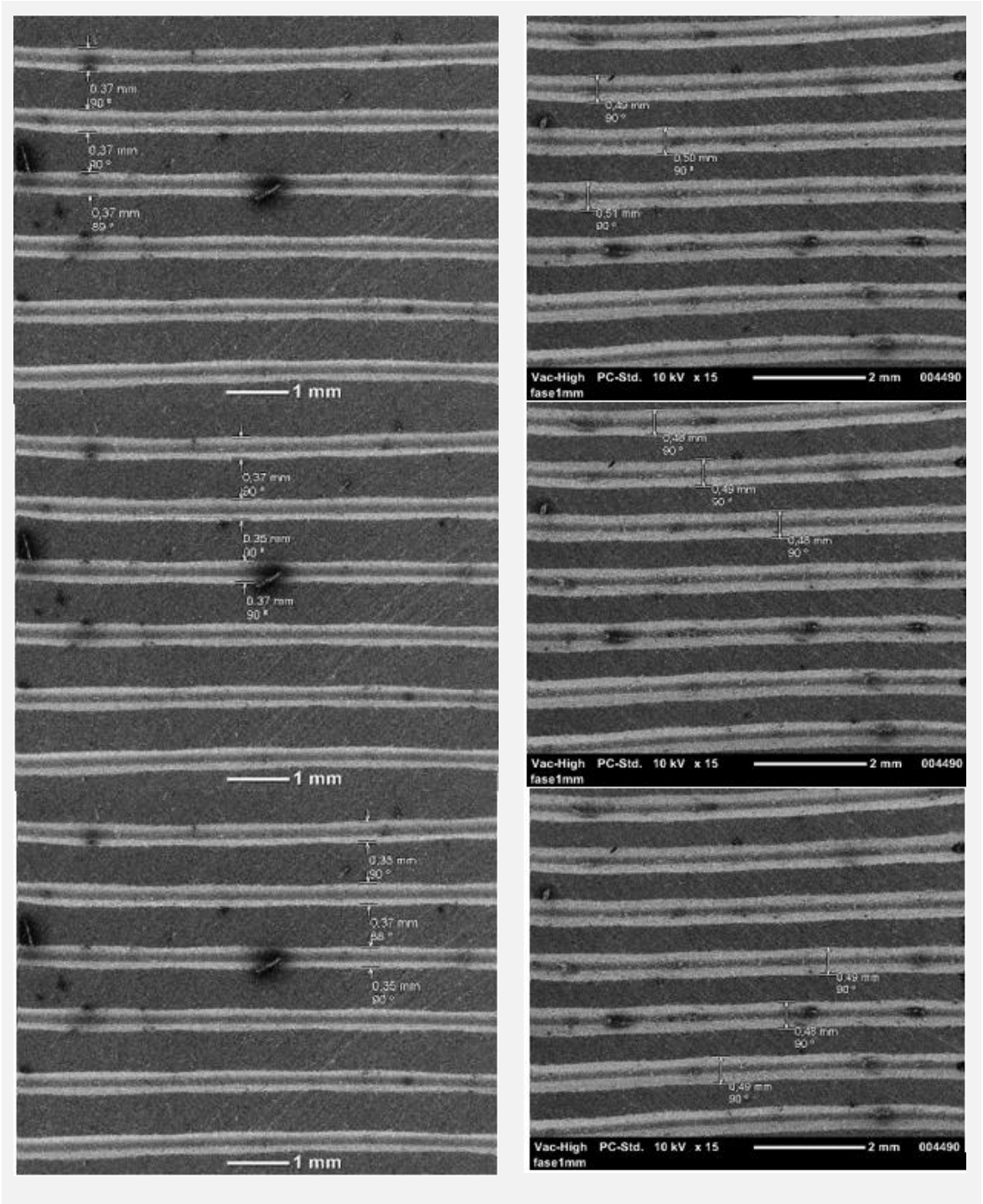
Anexos

Anexo 1. (Programa de simulación trayectoria herramienta)

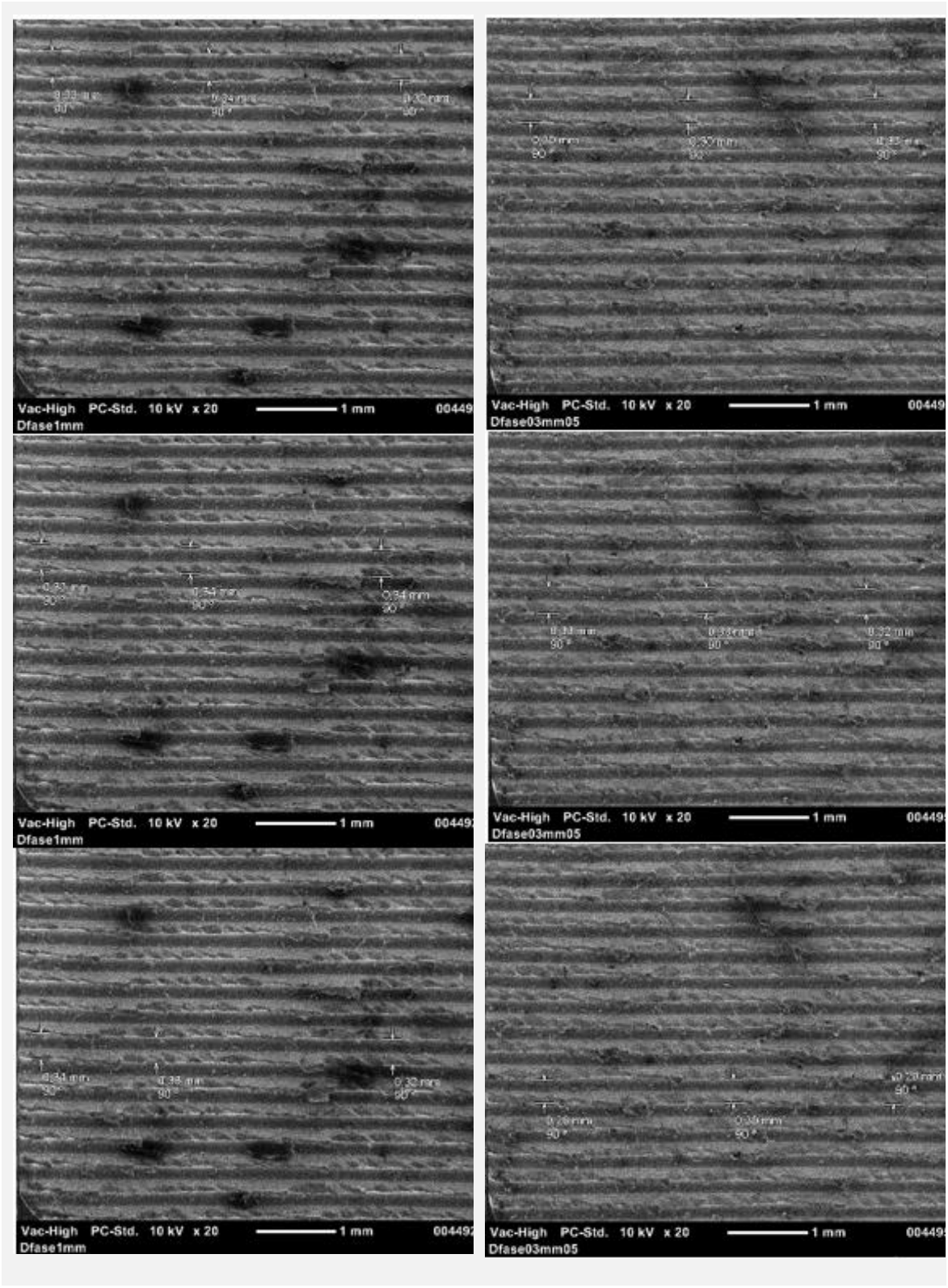
```
reset()
prueba tratectorias X
Vf= avance (mm/s)
t= tiempo de mecanizado (seg) ns=RPM
R=radio de la herramienta (mm)
w=velocidad de husillo (velocidad angular)
K= # de dientes

P=profundidad de pasada
L=longitud de mecanizado
Vf:=18.75
R:=30
ns:=300
K:=1
k:=1
w:=(PI*ns)/30
 P:=0.2
L:=1000
m:= -(P/L)
b:= 0
Xk1:=(Vf*t)+(R*sin((w*t)-((2*k*PI)/K)))
Yk1:= R*cos((w*t)-((2*k*PI)/K))
Zk2:= (m*t+b)
f3:=plot::Curve2d([t,Zk2], t=0..a, a=0..1)
plot(f3)
f1:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=0..a,a=0..0.7)
plot(f1)

dividir por intervalos

p1:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=0..a,a=0..1,TimeBegin = 0, TimeEnd = 1,LineWidth = 0.01):
p2:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=1..a,a=1..2,TimeBegin = 1, TimeEnd = 2):
p3:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=2..a,a=2..3,TimeBegin = 2, TimeEnd = 3):
p4:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=3..a,a=3..4,TimeBegin = 3, TimeEnd = 4):
p5:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=4..a,a=4..5,TimeBegin = 4, TimeEnd = 5):
p6:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=5..a,a=5..6,TimeBegin = 5, TimeEnd = 6):
p7:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=6..a,a=6..7,TimeBegin = 6, TimeEnd = 7):
p8:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=7..a,a=7..8,TimeBegin = 7, TimeEnd = 8):
p9:=plot::Curve2d([Xk1,Yk1],t=8..a,a=8..9,TimeBegin = 8, TimeEnd = 9):
pt:=(p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7,p8,p9) :
plot(pt)
```

Anexo 2 (Medidas tomadas en SEM del ancho del rasgo y tratamiento de datos estadísticos)

Tex1 **Tex2**



Tex3 **Tex4**


Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase1mm
Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase03mm05
Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase1mm
Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase03mm05
Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase1mm
Vac-High PC-Std. 10 kV x 20 1 mm
Dfase03mm05

Estadísticos

Ancho del rasgo

N	Válido	36
	Perdidos	0
Media		,3725
Mediana		,3450
Varianza		,005

Ancho del rasgo

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	,28	1	2,8	2,8	2,8
	,29	1	2,8	2,8	5,6
	,30	3	8,3	8,3	13,9
	,32	5	13,9	13,9	27,8
	,33	4	11,1	11,1	38,9
	,34	4	11,1	11,1	50,0
	,35	3	8,3	8,3	58,3
	,37	6	16,7	16,7	75,0
	,46	1	2,8	2,8	77,8
	,48	2	5,6	5,6	83,3
	,49	4	11,1	11,1	94,4
	,50	1	2,8	2,8	97,2
	,51	1	2,8	2,8	100,0
	Total	36	100,0	100,0	

Anexo 3 (pruebas de validación de datos Kolmogorov-Smirnov)

Estadísticos

		Masa Probeta(mg)	Probeta tratada (mg)	pérdida de masa total
N	Válido	15	15	15
	Perdidos	0	0	0
Media		129122,5000	128844,2933	278,207
Desv. Desviación		20753,39820	20747,32620	236,0332
Varianza		430703536,671	430451544,625	55711,685

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Masa Probeta (mg)	Probeta tratada (mg)	pérdida de masa total
N		15	15	15
Parámetros normales[a,b]	Media	129122,5000	128844,2933	278,207
	Desv. Desviación	20753,39820	20747,32620	236,0332
Máximas diferencias extremas	Absoluto	,235	,235	,134
	Positivo	,235	,235	,131
	Negativo	-,227	-,229	-,134
Estadístico de prueba		,235	,235	,134
Sig. asintótica(bilateral)		,025[c]	,025[c]	,200[c,d]

a. La distribución de prueba es normal.

b. Se calcula a partir de datos.

c. Corrección de significación de Lilliefors.

d. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Anexo 4 (Prueba Krustal-Wallis)

Rangos

	Textura	N	Rango promedio
Pérdida de masa de las probetas	1	3	8,00
	2	3	9,67
	3	3	5,67
	4	3	11,00
	5	3	5,67
	Total	15	

Estadísticos de prueba[a,b]

	Pérdida de masa de las probetas
H de Kruskal-Wallis	3,400
gl	4
Sig. asintótica	,493

a. Prueba de Kruskal Wallis

b. Variable de agrupación: Textura

Anexo 5 (Prueba Wilkoxon)

Rangos

		N	Rango promedio	Suma de rangos
Probeta tratada (mg) - Masacero(mg)	Rangos negativos	15[a]	8,00	120,00
	Rangos positivos	0[b]	,00	,00
	Empates	0[c]		
	Total	15		

a. Probeta tratada (mg) < Masacero(mg)

b. Probeta tratada (mg) > Masacero(mg)

c. Probeta tratada (mg) = Masacero(mg)

Estadísticos de prueba[a]

	Probeta tratada (mg) - Masacero(mg)
Z	-3,408[b]
Sig. asintótica(bilateral)	,001

a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon

b. Se basa en rangos positivos.