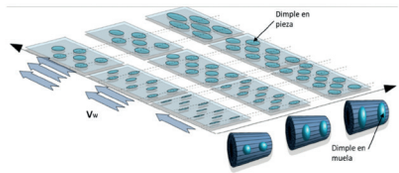
Texturizado por rectificado para la mejora de propiedades de fricción en componentes industriales



Texturing by grinding for the improvement of friction properties in industrial components

Maria Garcia Moreno[1], Jorge Álvarez Ruiz[1], David Barrenetxea Azpeitia[1] y Leire Godino Fernández[2]
[1] IK4-Ideko. Calle Arriaga, 2 - 20870 Elgoibar, Gipuzkoa (España).
[2] Universidad del Pais Vasco UPV/EHU. Escuela de Ingeniería. Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9385 | Recibido: 11/09/2019 • Inicio Evaluación: 30/09/2019 • Aceptado: 16/12/2019

ABSTRACT

- The economic and environmental cost of friction in machinery and transport is significantly remarkable being the machine tool one of the most affected. In this sector, the movements are totally affected by the friction originated in the displacements between the guideways and the carriages, which results in terms of precision, energy consumption and component wear. In this line, texturing has proved to be a useful tool to reduce friction. Texturing techniques include frosting and scraping, both manual and costly processes in which the final finish of the workpiece depends on the operator. Other techniques such as laser texturing represent an effective and precise procedure which is at the same time expensive and not applicable in large workpieces. One of the main challenges is to develop techniques capable of producing these textures in a repetitive and economically viable way. In this work, a new assisted dressing technique that allows generating different textures by grinding, controlling the geometry and distribution of these, is presented. This technique allows to create textures in large workpieces, such as the guides of the machine tools and to do it in a repetitive way and in the same machine in which the guide has been ground previously, which entails a reduction in time and costs. This technique has been validated through tribological tests obtaining lower friction coefficients than with manual techniques.
- **Keywords:** Friction, grinding, texturing, dimples, machine-tool, guideways.

RESUMEN

El coste económico y medioambiental que supone la fricción en maquinaria y transportes es significativamente llamativo, siendo la máquina-herramienta una de las más afectadas. En este sector, los movimientos están totalmente afectados por la fricción originada en los desplazamientos entre las guías y carros, lo cual se traduce en términos de precisión, consumo energético y desgaste de componentes. En esta línea, el texturizado ha demostrado ser una herramienta útil para la reducción de la fricción. Entre las técnicas de texturizado se encuentran el floreteado y el rasqueteado, ambos procesos manuales y costosos en los que el acabado final de la pieza depende del operario. Otras técnicas como el texturizado por láser suponen un procedimiento eficaz y preciso a la par que costoso y no aplicable en piezas grandes. Uno de los principales retos consiste en desarrollar técnicas capaces de producir estas texturas de una manera repetitiva y económicamente viable. En este trabajo se presenta una nueva técnica de diamantado asistido que permite generar diferentes texturas mediante el rectificado, controlando la geometría y distribución de éstas. Esta técnica permite crear texturas en piezas grandes, como pueden ser las guías de las máquinas-herramienta y hacerlo además de forma repetitiva y en la misma máquina en la que se ha rectificado la guía previamente, lo que supone una reducción en tiempos y costes. Esta técnica se ha validado mediante pruebas tribológicas obteniendo coeficientes de fricción más reducidos que con las técnicas manuales.

Palabras clave: Fricción, rectificado, texturizado, *dimples*, guías, máquina herramienta.

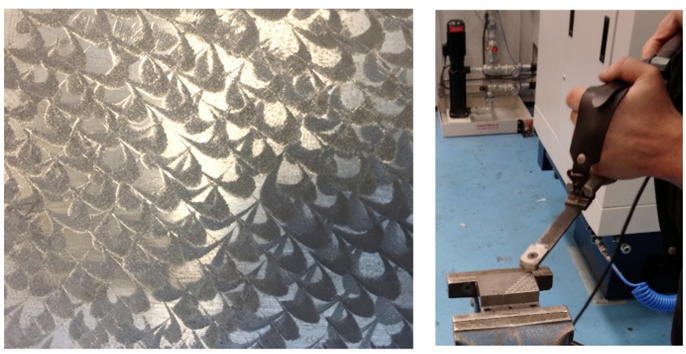
1. INTRODUCCIÓN

La fricción es la fuerza de resistencia al deslizamiento relativo de un sólido sobre otro. La fricción está siempre presente, aunque se coloque un lubricante entre las superficies para reducirla. Hoy en día, la fricción es una de las mayores preocupaciones en la fabricación e industrias como la automotriz y los bienes de equipo, están invirtiendo fuertemente en la investigación sobre cómo reducir de la fricción y el desgaste en los sistemas mecánicos [1-5]. Los resultados de estudios realizados en torno a la tribología de equipos para el transporte, la generación de energía y la maquinaria industrial indican la posibilidad de ahorrar una décima parte del consumo total de energía a través de mejores prácticas tribológicas, lo cual podría suponer un ahorro energético de miles de millones de euros únicamente en Europa.

La máquina herramienta es uno de los sectores más afectados por la fricción. En este sector, los movimientos están totalmente afectados por la fricción originada en los desplazamientos entre las guías y carros, lo cual se traduce en términos de precisión, consumo energético y desgaste de componentes.

Entre los métodos de fabricación destinados a la reducción de la fricción, se encuentran el floreteado y el rasqueteado. Si bien el objetivo principal del rasqueteado es asegurar el buen contacto entre dos superficies, mediante el floreteado lo que se pretende es conseguir unas depresiones sobre la superficie de deslizamiento para que el lubricante se deposite y así asegurar la presencia de lubricante en la zona de contacto en todo momento, disminuyendo el rozamiento durante el movimiento relativo (Fig. 1a). Es un método de acabado superficial que se realiza por extracción de virutas finas mediante una herramienta metálica con una punta de carburo y que ha de llevarse a cabo sobre superficies que ha-

yan sido ya mecanizadas previamente (Fig. 1b). Como resultado, la fricción se mantiene en valores bajos, se evitan problemas de deslizamiento como el *stick-slip* y la vida útil de las superficies de las guías de deslizamiento se prolonga. Sin embargo, el floreteado es un trabajo laborioso para el operario, incluso utilizando herramientas eléctricas. Además, siendo una operación manual, es un proceso incontrolado, poco rentable y que requiere mucho tiempo. Adía de hoy el floreteado tiene definidos unos escasos parámetros de validación orientativos en cuanto a forma de la huella, orientación de esta y porcentaje de huella sobre la superficie total, pero no se llega a realizar ninguna medición cualitativa de la geometría de la superficie lograda ni de su capacidad tribológica.



(a) (b)

Fig. 1: (a) Superficie de hierro fundido floreteada, (b) operación manual de floreteado

Para evitar los inconvenientes del floreteado, surge la alternativa de implementar diferentes texturas en las superficies de las guías para mejorar su comportamiento de fricción. Se han realizado importantes trabajos de investigación en texturización de superficies con este objetivo. En 2009 y 2010, L. Galda et al. [6-7] estudian la influencia de diferentes formas y disposiciones de las bolsas de aceite en la fricción y sus efectos en la resistencia al desgaste de los rodamientos de acero. Las texturas se fabricaron mediante bruñido y las pruebas tribológicas realizadas mostraron una mejora en el comportamiento de resistencia al desgaste en superficies texturizadas y, además, la forma demostró ser el factor principal en esta mejora. M. Nakako et al. [8] utilizaron un láser para la micro-texturización, generando hoyuelos de 4-6 µm de profundidad y 58-80 µm de diámetro en superficies de acero endurecido. En este caso las pruebas de tribología *pin-on-disc* demostraron ampliar el rango del régimen de lubricación hidrodinámica en términos de carga y velocidad de deslizamiento, así como la reducción del coeficiente de fricción, concluyendo que una menor densidad de hoyuelos era más beneficiosa para la lubricación. El texturizado por láser supone un procedimiento eficaz y preciso a la par que costoso y no aplicable en piezas grandes. En el trabajo desarrollado por M. Nakako et al. [9] se comparó la micro-texturización mediante granallado en superficies de hierro fundido de 6-10 µm de profundidad y 60 µm de diámetro, con ranuras fresadas de 40-50 µm de profundidad y 500 µm de diámetro y superficies planas. Los patrones ranurados suprimieron la generación de presión hidrodinámica que resultó en una mayor fricción. El micro-patrón de hoyuelos incrementó la capacidad de carga de la película lubricante, lo que lleva a una menor fricción.

Por tanto, es necesario implementar en la industria un proceso que permita texturizar superficies sin aumentar significativamente los costes ni los tiempos de ciclo. Surge así la opción del texturizado por rectificado. El rectificado es una técnica rentable, fácilmente controlable mediante los parámetros de proceso. Otro punto a favor es que mediante el rectificado el texturizado puede aplicarse a cualquier tipo de superficie independientemente del material, desde longitudes pequeñas de 10-20 mm hasta las más largas de 12-18 metros. En el caso de las guías de fabricación industrial, el texturizado por rectificado presenta además la importante ventaja de que el rectificado ya forma parte de los procesos de fabricación de las guías, por lo que no es necesario realizar inversiones adicionales y los costes de operación no se incrementarían significativamente.

La evolución histórica de las técnicas de texturizado por rectificado es la siguiente. El texturizado por rectificado se introdujo por investigadores del CIRP [10], con un método basado en rectificar con muelas con patrones helicoidales creados con un diamantador monopunta utilizado parámetros de rectificado especiales, y que fue aplicado a rodamientos cerámicos. Los resultados de la investigación en el modelizado del proceso, la simulación y los experimentos se mostraron en publicaciones posteriores [11-15]. En 2009 Denkena et al. [16] proponen una nueva estrategia para obtener micro perfiles en la superficie de la muela. En este caso, el diamantado se realiza con diamantadores de disco perfilados. La técnica se aplicó para implementar micro-ranuras en los álabes de compresores para reducir la fricción en el flujo turbulento. En la continuación del estudio [17] se encuentran reducciones de hasta el 4% en la fricción. Oliveira et al. presentan otra técnica que texturiza la superficie de la muela mediante la modificación continua de la profundidad de pasada de diamantado [18-19]. Esta modificación se obtiene conectando el diamantador a un dispositivo. El rango de texturas que se puede lograr aumenta como se muestra en diferentes casos de estudio.

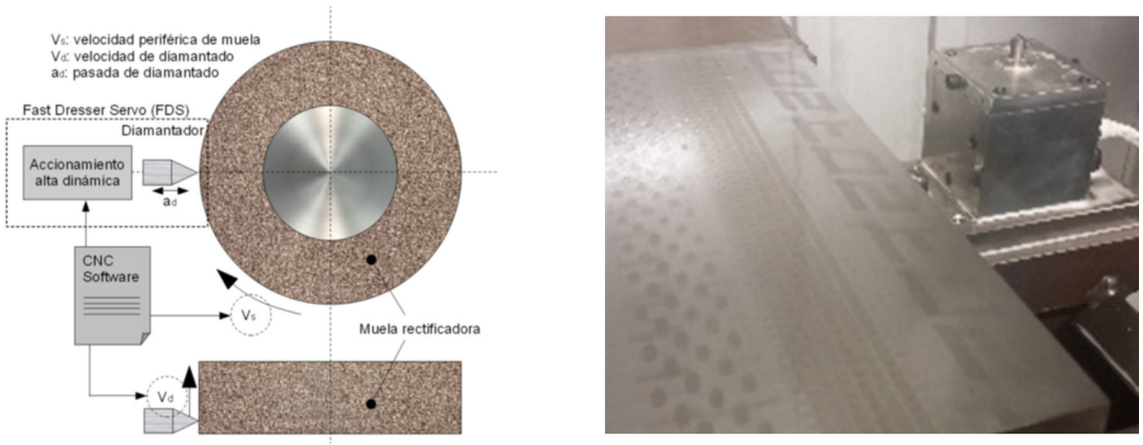
En este documento, se presenta una solución industrial para reducir la fricción en las superficies de las guías de hierro fundido. Esta reducción de la fricción se logra mediante un método de texturizado por rectificado. El texturizado debe implementarse en la superficie de la muela mediante una operación de diamantado realizada por un nuevo dispositivo de diamantado asistido. El dispositivo de texturizado desarrollado a partir del concepto presentado por Oliveira en [18], así como el procedimiento utilizado para texturizar y las ventajas y desventajas de los diferentes patrones de texturas evaluados mediante pruebas tribológicas se recogen en el presente documento. Finalmente, se muestran las conclusiones de la investigación, así como el trabajo a realizar a futuro.

2. DESARROLLO

2.1. DIAMANTADO ASISTIDO

El dispositivo es un sistema de diamantado asistido por vibraciones, desarrollado con el objetivo de disponer de una tecnología para generar patrones definidos en la superficie de la muela rectificadora mediante el proceso de diamantado.

La metodología de aplicación de esta tecnología se basa en la generación de señales desde un dispositivo que se manda al actuador piezoeléctrico, el cual actúa sobre el diamantador, confiriéndole un movimiento controlado de penetración durante el proceso de diamantado. Mediante el correcto ajuste de la velocidad de avance de diamantado, la velocidad de giro de muela y las señales de entrada, se pueden generar diferentes tipos de patrones sobre la superficie de la muela. Estos patrones se copiarán posteriormente en la pieza rectificada, generando superficies funcionales en función de los patrones generados en la muela y los parámetros de rectificado empleados.



(a) (b)

Fig. 2: Dispositivo de diamantado asistido (a) esquema de funcionamiento, (b) dispositivo en máquina

El dispositivo consiste en un sistema compuesto por los elementos que se muestran en la Fig. 2:

- Un actuador piezoeléctrico colocado en el diamantador monopunta.
- Un utillaje para unir el actuador al diamantador.
- Un dispositivo para generar las señales de entrada al actuador.
- Un software para definir el tipo de señal en función de las condiciones de diamantado y la superficie que se quiere conseguir.

Partiendo de este concepto presentado por Oliveira et al. [18] se ha desarrollado el diseño del utillaje donde montar el actuador piezoeléctrico y el diamantador. Para ello se han realizado cálculos de dinámicos y de rigidez. El utillaje diseñado tiene unas dimensiones generales de 92 x 94 x 84 mm y se ha fabricado en aluminio ya que este tiene un mejor comportamiento a fatiga que el acero.

En el diseño del utillaje se ha tenido en cuenta la necesidad de alojar todo el cableado y la refrigeración del interior del dispositivo que se realiza con aire comprimido. Otro aspecto que se ha cuidado en el diseño es la estanqueidad del dispositivo ya que durante el proceso de diamantado y rectificado se trabaja con taladrina. Por ello, se ha cuidado que ninguna de las aristas comunique directamente con el exterior y que la parte móvil pueda albergar dos juntas tóricas. Además, el aire comprimido que se utiliza para la refrigeración del dispositivo genera una presión positiva interna que dificulta la entrada del refrigerante. La validación del diseño del utillaje mediante un análisis FEM.

2.2. ANÁLISIS TEÓRICO

Existe una infinidad de posibilidades a la hora de crear una textura. La forma, el tamaño y la profundidad de los hoyuelos o *dimples*, la distribución de estos y la densidad de textura frente a la superficie total son los diferentes parámetros a definir.

Teniendo en cuenta los trabajos realizados previamente por Galda et al. sobre la influencia de la forma de las bolsas de aceite [6-7] en los que los mejores resultados de fricción se obtienen con texturas de forma esféricas, se ha optado por utilizar este tipo de formas, lo cual se consigue generando texturas cilíndricas en la muela. Con el objetivo de que este coeficiente de fricción se mantenga constante, la textura generada en la superficie de la guía tiene una distribución que garantiza que durante todo el recorrido siempre hay la misma proporción de textura frente superficie total en contacto con el carro. Además, se ha definido un solapamiento transversal entre *dimples* para garantizar que el carro se encontrará siempre con una capa de lubricante alojada dentro del *dimple* que pueda arrastrar a la zona sin textura, crear una capa de lubricante entre las superficies y reducir la fricción entre la guía y el carro.

El ancho de *dimple* generado en la superficie texturizada es igual al ancho de *dimple* generado en la muela mediante el diamantado asistido. Esto se debe a que los *dimples* de forma cilíndrica de la muela tienen un diámetro constante en toda su altura. La anchura mínima del *dimple* que se puede generar en la muela y, por lo tanto, en la superficie texturizada está limitada por la velocidad de respuesta del actuador piezoeléctrico y de la velocidad transversal de diamantado. El ancho máximo estará limitado por el ancho de la muela y el número de *dimples* que se quieran generar en ese ancho.

El largo del *dimple* que se obtiene como resultado en la guía (l_{dimp}) depende de diferentes factores: la longitud de contacto, la longitud del *dimple* creado en la muela mediante el diamantado asistido (P_{dimp}) y la velocidad de avance de rectificado (v_w). Si se discretiza el perímetro de la muela en puntos (p_{vuelta}), la longitud del *dimple* generado en la superficie de la guía se puede calcular de la siguiente manera:

$$l_{dimp} = 2 \cdot \sqrt{d_s \cdot a_e} + \frac{p_{dimp}}{p_{vuelta}} \cdot v_w \qquad (2.1)$$

La longitud de contacto es la trayectoria que describe cada punto de la periferia de la muela sobre la guía y que para un mismo diámetro de muela (d_s), varía en función de la profundidad de pasada de rectificado (a_e). Cuanto mayor sea la profundidad de pasada de rectificado, mayor será la longitud del *dimple* que se

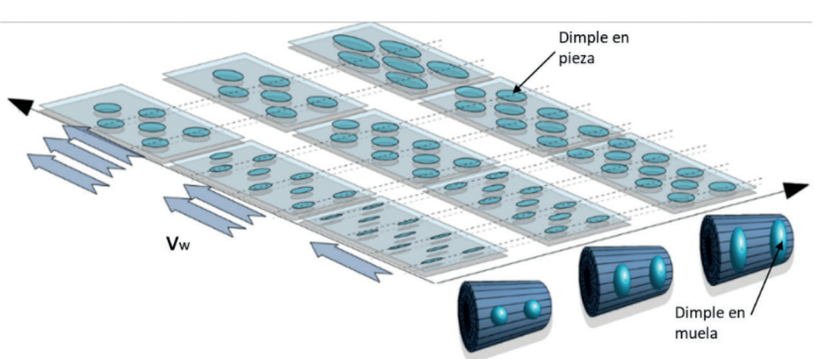


Fig. 3: Influencia de la velocidad de avance y tamaño de dimple de muela

crea en la guía. Además, la profundidad de pasada de rectificado define la profundidad del *dimple* generado en la guía. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este caso dicha profundidad está limitada por la altura del *dimple* que se haya creado en la muela con el diamantado, que corresponde a a_d. Si la profundidad de pasada de rectificado es igual o mayor a la altura de *dimple* en la muela, al rectificar la guía para crear la textura la parte lisa de la muela también estará rectificando y por lo tanto la profundidad de *dimple* que se obtiene en la guía será igual a la altura de *dimple* de la muela. De la misma manera, la longitud de *dimple* que depende de la longitud de contacto estará también limitada de esta forma.

En cuanto a la longitud del *dimple* creado en la muela, esta depende de la señal que se le comande al diamantado asistido, en la cual se define el tiempo durante el cual el diamantador se tiene que retirar (tiene que penetrar menos en la muela) para crear la textura.

Finalmente, una velocidad de avance de rectificado mayor o menor hace que los surcos generados se alarguen o acorten respectivamente. Además, también define la distancia longitudinal entre las texturas creadas por el mismo *dimple* de la muela. Para un avance de rectificado más rápido o más lento el espaciado será mayor o menor respectivamente, consiguiendo así una densidad menor o mayor de *dimples*.

Se muestra el siguiente diagrama como resumen de la influencia del largo de *dimple* creado en la muela y la velocidad de avance (fig. 3). En él se puede ver que, para una misma velocidad de avance, la distancia longitudinal entre *dimples* es la misma, pero dependiendo de la longitud del *dimple* que se haya creado en la muela con el diamantado el área superficial de la textura puede ser mayor o menor. De la misma manera, si se varía la velocidad de avance para una misma textura de muela, varía la distancia longitudinal entre *dimples*, pero también la longitud de estos (como se muestra la ecuación 2.1).

2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS DE RECTIFICADO Y GENERACIÓN DE SEÑAL

Con el objetivo de automatizar el cálculo de los parámetros de rectificado y generar la señal a comandar al diamantador asistido para obtener en la guía una textura que cumple con todos los requisitos definidos, se ha desarrollado un modelo que tiene en cuenta la influencia de todos los parámetros anteriormente analizados. En líneas generales, el modelo funciona de la siguiente manera:

1. Se definen las dimensiones del área de contacto y el porcentaje de superficie plana con respecto a la superficie total que se quiere conseguir en la zona (*perc*). Esta proporción se mantendrá constante a lo largo de la guía.
2. Se define el tamaño del *dimple* que se quiere obtener en términos de longitud (l_{dimp}), ancho (w_{dimp}) y profundidad (a_{dimp}).
3. Se definen los parámetros de diamantado teniendo en cuenta la calidad superficial que hay que obtener en las zonas de la guía en la que no hay *dimples* y también las limitaciones de la máquina. Por ejemplo, es importante tener en cuenta que la velocidad de giro de la muela en el diamantado (n_{sd}) y la velocidad de giro de la muela en el rectificado (n_s) tienen que ser iguales y que esta velocidad de giro afecta a la velocidad de avance necesaria para conseguir la textura deseada.
4. Se realiza el cálculo de los parámetros de rectificado a comandar en la máquina para obtener la textura deseada:
   - $a_e = a_{dimp}$
   - $n_s = n_{sd}$
   - $Nº\ de\ pasadas = 1$
   - $v_w = n_s \cdot (l_{dimp} - 2 \cdot \sqrt{d_s \cdot a_e}) \cdot nº\ puntos\ muela / nº\ puntos\ dimple$
5. Se genera la señal para el diamantador asistido, creando una matriz de dimensiones que representa la superficie de la muela (fig. 4). En esta superficie se simula una pasada de diamantado (a_d) excepto en las áreas en las que el diamantador se tiene que retirar para crear las texturas.
6. Esta señal se carga en el software desarrollado para la aplicación, en la que se define el tipo de piezoeléctrico que se va a utilizar. De esta forma la señal generada anteriormente se traduce en el voltaje a comandar al piezoeléctrico en cada instante. Esta señal de voltaje es la que controla la mayor o menor penetración del diamantador en la muela, generando así la textura. Durante el diamantado con el fin de controlar el largo (l_{dimp}), ancho (w_{dimp}) y profundidad de *dimple* (a_{dimp}) que estamos generando en la muela, se adquiere la señal real de voltaje del piezoeléctrico y se compara con la generada con el software.

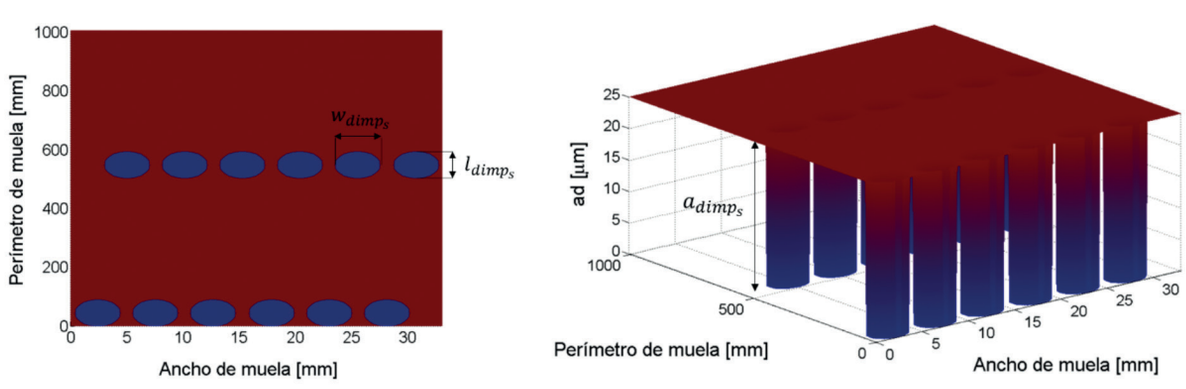
3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la generación de texturas empleando el modelo desarrollado en el anterior apartado, así como los resultados de los coeficientes de fricción obtenidos en las pruebas tribológicas para cada textura. Se ha trabajado con un centro de mecanizado DS-630, una muela de Norton de diámetro 320 mm y un diamantador monopunta con un ancho efectivo de 0,8 mm.

3.1. GENERACIÓN DE TEXTURAS

3.1.1. Diseño de probetas

Para simular el funcionamiento de las guías y los carros de las máquinas y teniendo en cuenta las características del tribómetro



(a) (b)

Fig. 4: Señal FDS para texturizar la muela (a) 2D, (b) 3D

en el que posteriormente se van a realizar las pruebas tribológicas, se han diseñado dos probetas:

- Miniguía: probeta de GG30 con una superficie de 64x40 mm sobre la que se generan las texturas mediante rectificado.
- Minicarro: probeta compuesta por un cuerpo cuadrado de GG30 en cuya superficie de 30x30 mm se pega una tira de turcite de espesor 3 mm.

3.1.2. Rectificado previo de probetas

Antes de generar las texturas en la superficie de las miniguías es necesario rectificar tanto las miniguías como los minicarros para conseguir las tolerancias superficiales (Ra = 0,8) que se le exigen a este tipo de superficies. Para ello se rectifican todas las superficies con parámetros similares a los que se emplean en la actualidad en el rectificado de las superficies de guías y carros, las cuales se muestran en la tabla I. Con estas condiciones se ha obtenido en la dirección transversal una rugosidad Ra = 0,42 y Rz = 2,13.

	Condiciones habituales	Pruebas Ideko
Muela	Muela con elevada porosidad, tamaño de grano basto 46-60 y dureza baja F-H.	Norton Vortex IP A60F.H 26VTX2
Velocidad de corte (m/s)	25-35	33
Avance (mm/min)	15000-25000	9390
Pasada de rectificado (mm)	0,005	0,005
Diamantado avance (mm/min)	120-240	200
Diamantado pasadas	2x0,02	2x0,02
Pasadas Chispeo	2-4	4

Tabla I: Condiciones de diamantado y rectificado previo de probetas

3.1.2. Texturizado de miniguías

Con el objetivo de definir las texturas, en primer lugar, se ha realizado un análisis de la superficie que se genera en las guías de las máquinas mediante el floreteado. En las siguientes fig. 5a y fig. 5b obtenidas mediante el microscopio confocal, se muestra la topografía de una superficie floreteada. En el perfil A obtenido de la medición se puede ver que la profundidad de los surcos generados no es constante siendo la profundidad media de 12 µm aproximadamente (fig. 5c). En el perfil B, se puede ver que el ancho medio de la zona más grande de las formas escamadas que se generan con el floreteado es de 3,7 mm. Aplicando la curva de Abbott Firestone a esta superficie se ha visto que tiene un 25% de superficie plana con respecto a superficie total.

Teniendo en cuenta todo esto se han definido las texturas que se muestran en la tabla II. Se ha creado una textura base de 12 µm de profundidad con un porcentaje del 25% de superficie plana con respecto a superficie total para simular el floreteado. A partir de esta, se han generado otras cinco probetas más con diferentes profundidades y densidades de surco para ver cómo afectan estas características al coeficiente de fricción. Todas las texturas creadas tienen una anchura de *dimple* de 3,7 mm.

Para todos los casos la muela se ha diamantado con las siguientes condiciones: n_{sd}= 1800 rpm, a_{vd}= 0,1 mm/rev y a_d= 25 µm. Empleando las condiciones de rectificado que se muestran para cada caso, la topografía de la superficie resultante en cada una de las miniguías es la que se puede ver en las imágenes obtenidas con el microscopio confocal.

Las mediciones realizadas con el confocal sirven para validar el modelo de cálculo de parámetros de rectificado y generación de la señal del diamantador asistido. De las topografías obtenidas se ha extraído el perfil de la superficie donde se puede medir el ancho y la profundidad de *dimple* para comprobar que coincide con lo definido. Además, aplicando la curva de Abbott Firestone se ha verificado que la proporción de superficie plana con respecto de superficie total es la comandada. De esta forma, los resultados obtenidos han servido para validar el modelo.

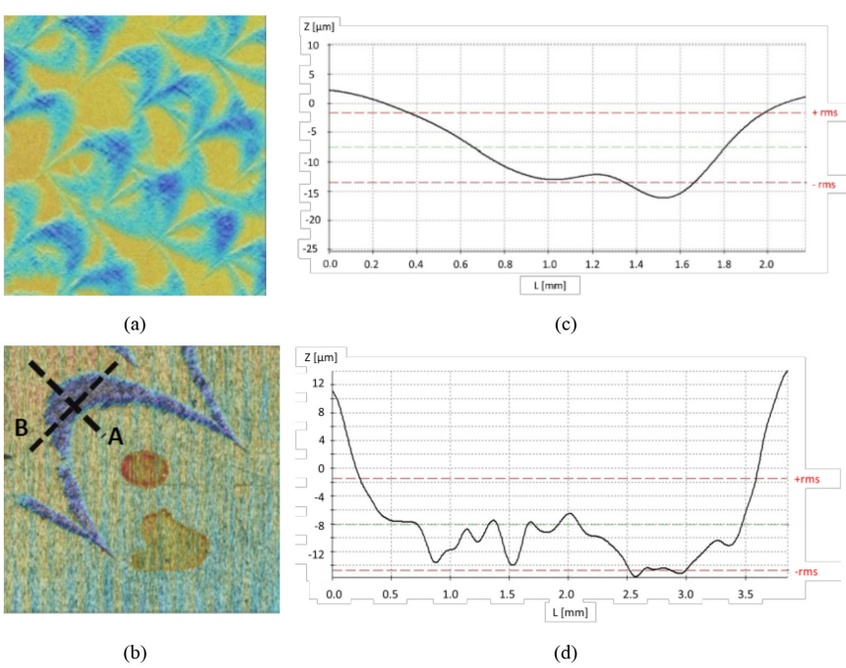


Fig. 5: Topografía del confocal de la probeta floreteada (a), detalle escama floreteado (b), perfil A del surco (c), perfil B del surco (d)

3.2. PRUEBAS TRIBOLÓGICAS

Con el objetivo de analizar la influencia de las diferentes texturas en el coeficiente de fricción y compararlas con el floreteado se realizan las pruebas tribológicas que se describen a continuación.

Se montan en un tribómetro UMT-3 de CETR las probetas en parejas, una miniguía y un minicarro. Durante los ensayos, la miniguía está fija y el minicarro se mueve a para simular el movimiento relativo entre la guía y el carro de la máquina. El movimiento lineal oscilatorio que hace el minicarro tiene un desplazamiento d de 10 mm y una frecuencia f de 0'1, 1, 7'5 y 15 Hz. La velocidad lineal es continuamente variable dentro de un ciclo, pero se toma como valor representativo $V=2\cdot d\cdot f$, lo que supone velocidades de 120-18000 mm/min.

A continuación, se muestra una comparativa de los resultados de fricción obtenidos para la probeta floreteada y las probetas con diferentes texturas, para diferentes frecuencias (fig. 6).

Como se puede ver, la textura floreteada muestra una tendencia a aumentar el coeficiente de fricción a medida que aumenta la frecuencia del movimiento oscilatorio, es decir, para mayores velocidades de desplazamiento del carro. Comparando el comportamiento de la miniguía floreteada con la textura base, se

puede ver que para frecuencias bajas el coeficiente de fricción es bastante similar, sin embargo, a medida que aumenta la frecuencia, la diferencia es más significativa ya que para la miniguía floreteada el coeficiente de fricción va en aumento y para la textura base va disminuyendo.

Entre las texturas con la misma profundidad de *dimple*, se observa que una menor proporción de superficie plana frente a superficie total, es decir, una densidad mayor de *dimples*, es mejor a la hora de obtener coeficientes de fricción bajos. En cuanto a la profundidad de *dimples* para una misma concentración, se observa que en general las probetas con mayor profundidad obtienen mejores resultados de coeficiente de fricción.

Comparando los resultados obtenidos con el floreteado frente a los obtenidos con las diferentes texturas, en general se puede observar que las texturas muestran coeficientes de fricción mejores sobre todo para frecuencias altas, en las que las texturas

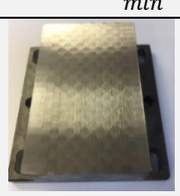
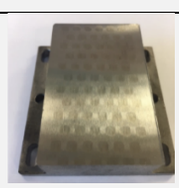
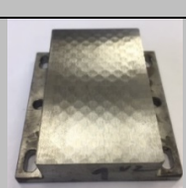
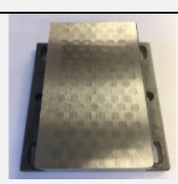
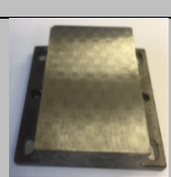
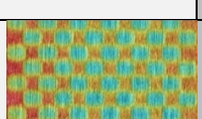
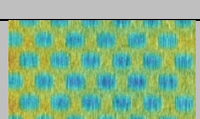
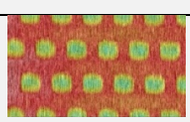
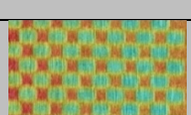
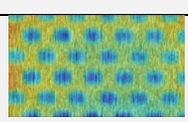
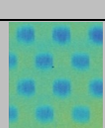
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Textura deseada en la superficie de contacto	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 25$	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 45\%$	$a_{dimp} = 12\ \mu m$ $perc = 66\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 25\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 45\%$	$a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 66\%$
Condiciones rectificado	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 9028\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 12352\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 12\ \mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 19923\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 9000\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 12273\ \frac{mm}{min}$	$Nº\ pasadas = 1$ $a_e = 8\mu m$ $n_s = 1800\ rpm$ $v_w = 19919\ \frac{mm}{min}$
Probeta texturizada						
Validación de la textura (topografía obtenida en el	 $a_{dimp} = 10\ \mu m$ $perc = 23{,}15\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 11\ \mu m$ $perc = 47{,}99\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 11\ \mu m$ $perc = 69{,}20\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 20{,}68\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 44{,}58\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$	 $a_{dimp} = 8\ \mu m$ $perc = 63\%$ $w_{dimp} = 3{,}7\ mm$

Tabla II: Definición de texturas, condiciones de diamantado y rectificado y topografía obtenida

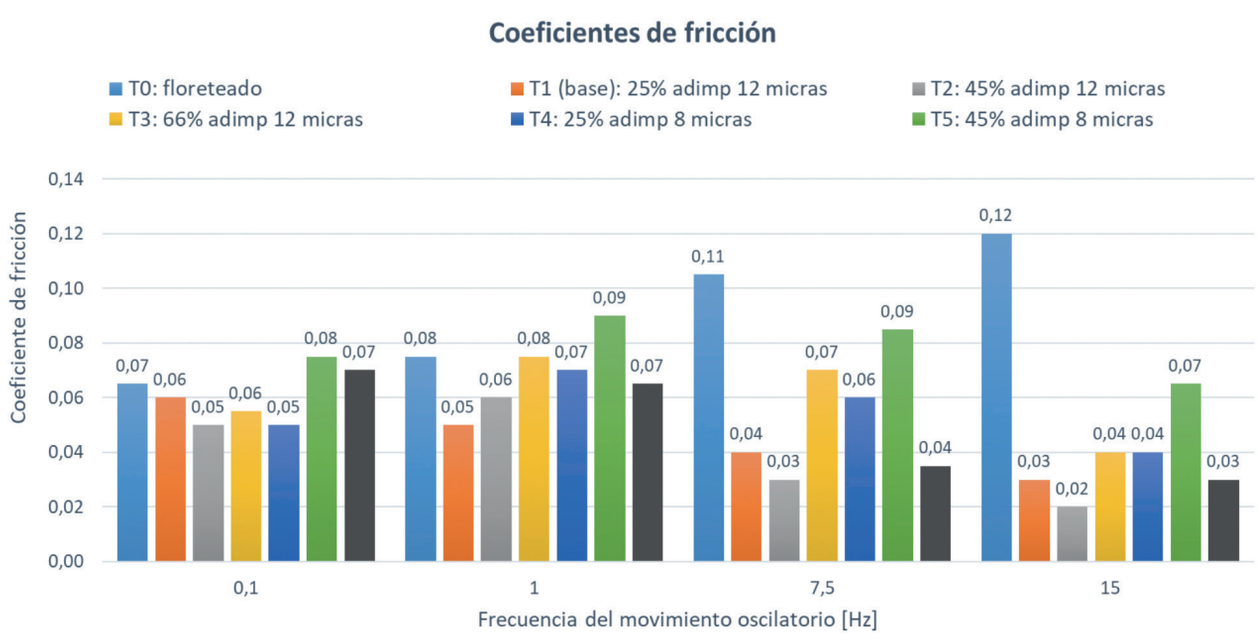


Fig. 6: Comparativa coeficientes de fricción de miniguías texturizadas

tienden a reducir el coeficiente de fricción al contrario que el floreteado. Las texturas T1 (base) y T2 son las que mejores resultados han dado.

4. DISCUSIÓN

Con la investigación desarrollada se ha dado respuesta a una problemática que hasta la fecha se resuelve de manera manual mediante floreteado. Se ha presentado tanto el modelo teórico como las pruebas de experimentación empleando tecnologías avanzadas de acuerdo con el estado del arte actual. Los resultados de fricción obtenidos mediante los ensayos tribológicos realizados para diferentes texturas generadas demuestran que el texturizado por rectificado es una alternativa con mayor potencial que el floreteado para su aplicación en la lubricación de las guías dentro del sector de la máquina herramienta. Estas ventajas competitivas se traducen en:

- Reducción coeficientes de fricción un 14-28% para frecuencias bajas y del 75-80% para frecuencias altas.
- Posibilidad generar diferentes texturas de forma controlada y repetitiva utilizando el dispositivo de diamantado asistido y el modelo de cálculo de los parámetros de rectificado desarrollados. Prueba de ello son los resultados de las mediciones del confocal en las que se observa que las texturas obtenidas como resultado son prácticamente iguales a las definidas (en la profundidad del surco el error es de entre 0 y 16% y en la densidad de la textura el error es de 5-17%).
- Reducción del tiempo necesario para conseguir las texturas, por tratarse de un proceso automatizado, sin aumentar significativamente los costes de operación ya que el rectificado ya forma parte del proceso de fabricación de las guías.

En vista de los resultados positivos obtenidos los próximos pasos pasan por introducir esta tecnología en el proceso real de fabricación de las guías de la máquina herramienta para analizar si estas mejoras del coeficiente de fricción se traducen en la mejora del funcionamiento de las máquinas en relación a la precisión obtenida observando efectos como el *stick-slip* o al comportamiento de las guías frente al desgaste.

REFERENCIAS

[1] A.W. Lang, P. Motta, P. Hidalgo, M. Westcott. "Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control?". Bioinspiration & Biomimetics. Octubre 2008. Vol. 3 – 046005. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-3182/3/4/046005.

[2] P.C. Salaberry. "Vehicle with drag-reducing outer surface". U.S. Patent 7810867 B2. 2010.

[3] N. Tagawa, D.B. Bogy. "Air film dynamics for micro-textured flying head slider bearings in magnetic hard disk drives". Journal of Tribology. Mayo 2002. Vol.124-3. p. 568-574. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1456084

[4] Z. Krzyzak, P. Pawlus, "'Zero-wear' of piston skirt surface topography". Wear. Febrero 2016. Vol.260-4. p.554-561. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.038

[5] S. Świrad. "The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements". Wear. Junio 2011. Vol.271-3. p.576-581. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.05.005

[6] L. Galda. P. Pawlus, J. Sep. "Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribek curve". Tribology International. Octubre 2009. Vol. 42-10. p.1505-1512. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.06.001

[7] L. Galda, A. Dzierwa, J. Sep, P. Pawlus. "The effect of oil pockets shape and distribution on seizure Resistance in Lubricated Sliding". Tribology letters. Febrero 2010. Vol.37-2. p.301-311. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-009-9522-7

[8] A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fensle, I. Etsion. "The effect of laser Surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact". Tribology International. Marzo 2005. Vol.38-3. p.219-225. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.004

[9] M. Nakano, A. Korenaga, A. Korenaga, K. Miyake, T. Murakami, Y. Ando, H. Usami, S. Sasaki. "Applying Micro-Texture to Cat iron Surfaces to Reduce the Friction Coefficient Under Lubricated Conditions". Tribology letters. Noviembre 2007. Vol.28-2. p.131-137. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-007-9257-2

[10] P. Stepien, M.Szafarczyk. "Generation of Regular Patterns on Ground Surfaces". CIRP Annals. Enero 1989. Vol.38-1. p.561-566. DOI: https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62769-3

[11] P. Stepien, B. Balasz. "Simulation of the formation process of regular grooves on the ground surface". Proceedings of the fourth annual industrial simulation conference, Eurosis, Palermo. Enero 2006. Vol. 269-276.

[12] P. Stepien. "Three Basic Types of Regular Surface Texture Generated by Plunge Grinding with the wheel having helical grooves". Advances in Manufacturing Science and Technology. 2006. Vol.30-3. p.37-54.

[13] P. Stepien. "Grinding forces in regular surface texture generation". International Journal of Machine Tools and Manufacture. Noviembre 2007. Vol.45-14. p.2098-2110. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.05.004

[14] P. Stepien. "The mechanism of grinding wheel surface reproduction in regular Surface texture generation". Surface Engineering. Mayo 2008. Vol.24-3. p.219-225. DOI: https://doi.org/10.1179/174329408X282596

[15] P. Stepien. "Regular Surface Texture Generated by Special Grinding Process". Journal of Manufacturing Science. Enero 2009. Vol.131-1.

[16] B. Denkena, L. de Leon, B. Wang. "Grinding of microstructured functional surfaces: a novel strategy for dressing of microprofiles". Production Engineering. Marzo 2009. Vol.3-1. p.41-48. DOI: https://doi.org/10.1007/s11740-008-0134-0

[17] B. Denkena, J. Kohler, B. Wang. "Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Septiembre 2010. Vol.3-1. p.14-26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.08.001

[18] J.F.G. Oliveira, A.C. Bottene, T.V. Franca. "A novel dressing technique for texturing of ground surfaces". CIRP Annals. Abril 2010. Vol.59-1. p.361-364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.119

[19] E. J. da Silva, J. F. G. de Oliveira, B. B. Salles, R. S. Cardoso, V. R. A. Reis. "Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels". CIRP Annals. Abril 2019. Vol. 62-1. p.355-358. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.123