

Efectos del bruñido con bola acustoplástico sobre la integridad superficial de Ti6Al4V

Ramón Jerez-Mesa¹, J. Antonio Travieso-Rodríguez¹, Giovanni Gómez-Gras², Jordi Llumà-Fuentes³

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya, ramon.jerez@upc.edu

²Departamento de Ingeniería Industrial, Institut Químic de Sarrià, Universitat Ramon Llull, giovanni.gomez@iqs.url.edu

³Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universitat Politècnica de Catalunya, jordi.lluma@iqs.url.edu

El bruñido con bola acustoplástico aprovecha la modificación del comportamiento plástico de los materiales cuando son sometidos a deformación durante la transmisión de ultrasonidos a través de su red cristalina. Se trata del llamado efecto acustoplástico. En esta contribución, una herramienta de bruñido con bola que incorpora un actuador piezoeléctrico es probada sobre diferentes superficies fresadas de Ti-6Al-4V. Se evalúan los resultados del proceso en términos de integridad superficial topológica, esto es, referente a la distribución de alturas de las diferentes huellas de bruñido. El bruñido acustoplástico demuestra una mejora en todos los parámetros explorados respecto de su homólogo no asistido por vibraciones, aunque esta mejora es mayor cuanto menor es la escala de la superficie sobre la que se aplica. Se demuestra que aquellas superficies que presentan características de menor escala son afectadas en mayor medida por el proceso.

1. Introducción

Los resultados de numerosos investigadores a lo largo de las últimas décadas han permitido confirmar los efectos positivos del bruñido sobre la integridad superficial de piezas industriales, en tanto que se trata de un proceso mecánico capaz de mejorar simultáneamente la topología superficial, la dureza y las tensiones residuales de los materiales objetivo [1]. El proceso está basado en deformar plásticamente las irregularidades de la superficie objetivo mediante una bola que transmite una fuerza controlada, todo mediante la programación de rutinas de control numérico que definen las dimensiones de la superficie objetivo.

Dado que las aplicaciones convencionales del bruñido pasan por la mejora del acabado de ejes o moldes, los materiales que han sido más extensamente estudiados son los más estándar desde un punto de vista industrial, esto es, aleaciones de acero, latón o aluminio. Sin embargo, el potencial de la tecnología para ser aplicada en otro tipo de piezas industriales, requiere de una focalización del estudio en otro tipo de materiales, y superficies objetivo. Aunque existen referencias aisladas sobre la aplicación del bruñido sobre materiales propios de otras industrias [2], en esta contribución se explora la modificación superficial de piezas de Ti6Al4V acabadas mediante rutinas de fresado hemisférico paralelo que da lugar a superficies periódicas formadas por picos y valles de distribución quasi Gaussiana, empleando diseño de experimentos para considerar la influencia de diferentes factores sobre la respuesta.

Por otro lado, la asistencia de procesos es una tendencia al alza en entornos de investigación industrial. Particularmente, las vibraciones ultrasónicas se han estudiado en detalle en otros procesos de mecanizado o deformación plástica masiva, demostrando que reducen la fricción que interviene en el proceso y disminuyen las fuerzas requeridas para el arranque de viruta o la deformación neta de volúmenes de material [3]. Adicionalmente, en ciertos casos la superposición de vibraciones a una fuerza de deformación de un cierto material deriva en una

reducción de la tensión quasi-estática requerida para generar deformación residual neta, a la vez que puede causar un efecto de autoendurecimiento en el material objetivo. Es el llamado efecto acustoplástico [4]. Este efecto fue empleado por Gómez-Gras *et al.* (2015) para asistir el proceso de bruñido mediante una vibración no ultrasónica, obteniendo resultados positivos [5]. Por todos estos motivos, se plantea en esta contribución emplear una herramienta de bruñido acustoplástico diseñada por los autores, que permita superponer una componente vibratoria a la fuerza de bruñido para evaluar el eventual efecto positivo en los resultados del proceso, lo que supone el segundo principal objetivo de los trabajos que aquí se presentan.

Los resultados del proceso de bruñido con bola acustoplástico se presentan aquí en términos de integridad superficial, como la adición de tres componentes diferentes que describen el estado superficial topológico tras el proceso, incluyendo parámetros tridimensionales para describir las distribuciones de alturas obtenidas según los parámetros de proceso. Para ello, se lleva a cabo un diseño de experimentos basado en una matriz ortogonal Taguchi de tipo L27, donde se incluyen diferentes fuerzas, avances, números de pasada, estrategias de bruñido y superficies de partida, y que se ejecuta dos veces para comprar los efectos de la vibración sobre los resultados del proceso.

2. Materiales y métodos

2.1. Herramienta de bruñido acustoplástico

La Figura 1 muestra un esquema de la herramienta empleada para esta investigación, que se compone fundamentalmente de tres módulos interconectados entre sí, tal y como se explica de forma extensa por Jerez-Mesa *et al.* (2018) [6]. El módulo de regulación de la fuerza consiste fundamentalmente en un muelle, cuya longitud de compresión define la precarga estática que se ejerce contra el material que es objetivo del proceso. Por otro lado, la unidad de transmisión de vibraciones está conformada por un transductor piezoeléctrico que, excitado externamente por un circuito de potencia, transmite un movimiento oscilatorio de frecuencia 39,1 kHz a la bola de la herramienta, que está apoyada en la parte inferior del módulo de transmisión de fuerza. Esta bola es la responsable de sumar ambas componentes de fuerza, y transmitirlas a la pieza objetivo para llevar a cabo el proceso.

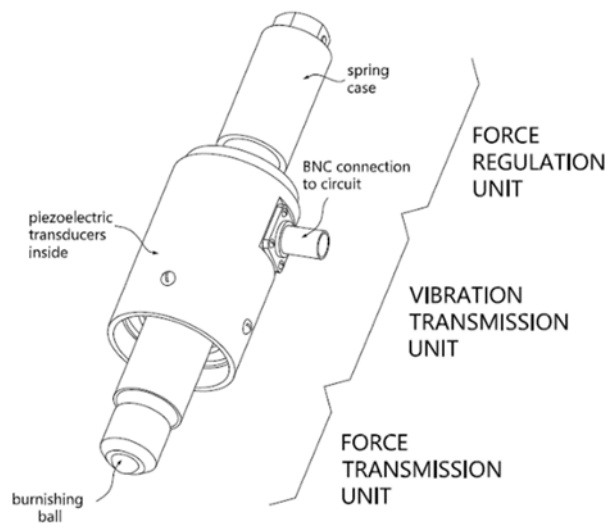


Figura 1: Módulos constitutivos de la herramienta de bruñido asistida por vibraciones ultrasónicas.

La herramienta descrita está protegida según la patente española P201730385 [7]. La activación del módulo de transmisión de vibraciones permite elegir el régimen de trabajo del proceso, de forma que si no se activa, la herramienta permite aplicar un proceso de bruñido convencional (nombrado en adelante como NVABB del inglés non-vibration-assisted ball burnishing), mientras que cuando se activa, el proceso pasa a ser asistido (con siglas VABB, del inglés vibration-assisted ball burnishing).

2.2. Diseño experimental según la matriz L27 de Taguchi

Con el fin de estudiar la influencia del máximo número posible de factores sobre las diferentes variables de resultado objetivo, se empleó una matriz L27 de Taguchi, reduciendo así el número de ensayos necesarios si se compara de un diseño factorial completo. Específicamente, se consideraron 5 factores y las interacciones entre tres pares de ellos, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.a.

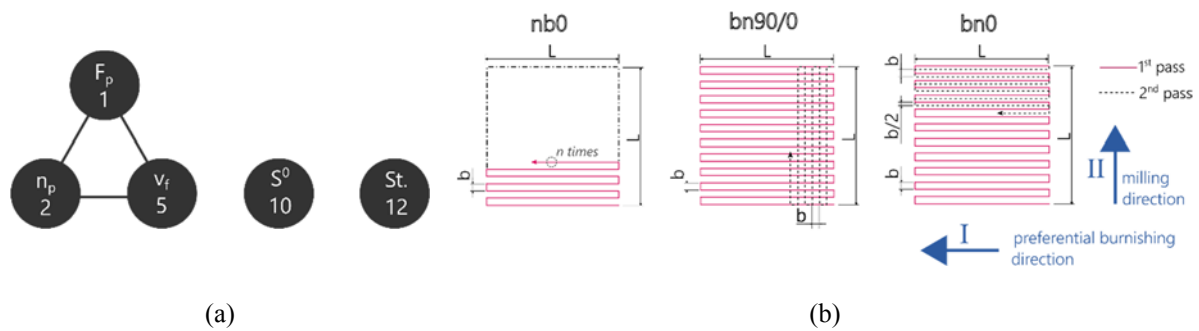


Figura 2: (a) Diagrama representativo de los factores (círculos) e interacciones de segundo orden (líneas) consideradas en el modelo de estudio. (b) Esquema de las diferentes estrategias consideradas en el diseño experimental.

En la Tabla 1 se han recopilado los diferentes factores incluidos en el diseño experimental, así como los tres niveles que adoptan dentro del mismo. La precarga (F_p) se corresponde con la fuerza ejercida por efecto de la compresión del muelle sobre el material, y el avance (F_p) es la velocidad a la que se desplaza la herramienta sobre la pieza objetivo. El número de pasadas (n_p) y la estrategia (St.) combinados, generan diferentes patrones para cubrir la superficie objetivo. Por ejemplo, la combinación de 3 pasadas con la estrategia $bn90/0$ contempla cubrir la superficie cuadrada objetivo completa una vez, volver hacia el punto inicial según la dirección perpendicular, y luego hacer una tercera y última pasada en la dirección original. El decalaje lateral se mantuvo fijo en 0,25 mm.

Tabla 1: Factores y niveles empleados para el diseño de la matriz experimental.

Factor	Niveles		
	1	2	3
F_p (N)	150	250	350
n_p	1	3	4
v_f (mm/min)	300	600	900
St.	nb0	bn90/0	bn0
S^0	S^0_1	S^0_2	S^0_3

La superficie original, codificada como S^0 , codifica la topología original producto de mecanizar sobre la pieza de estudio siguiendo tres estrategias diferentes, todas ellas consistentes en pasadas paralelas de una fresa hemisférica de diámetro 10 mm. Al aumentar el paso radial entre cada pasada, se obtienen superficies periódicas de aspecto ondulado, de manera que la superficie $S01$ se corresponde con aquella que muestra menos altura de cresta, y menor distancia entre pico-valle en la textura generada (Figura 3.a), mientras que al maximizar dicho paso lateral, se obtiene una superficie con características más abruptas, pero distribución de alturas similar (Figura 3.c).

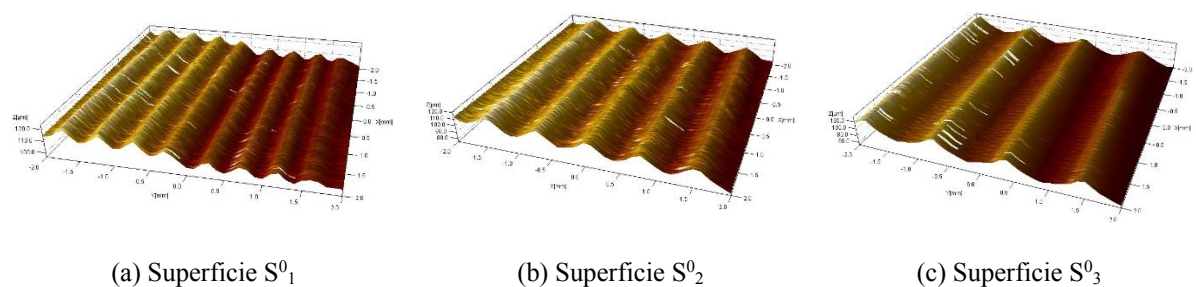


Figura 3: Mapas de altura obtenidas por cromatografía 3D de las tres superficies originales consideradas en el estudio.

Una vez definida la matriz experimental, los 27 ensayos requeridos para evaluar los efectos de los factores de estudio se llevaron a cabo dos veces sobre la pieza objetivo, una aplicando el proceso sin vibraciones y otra con el proceso con vibraciones, tal y como se muestra en la Figura 4.

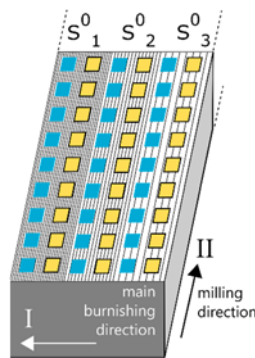


Figura 4: Representación esquemática de la pieza de ensayo, y los ensayos de bruñido realizados sobre ella (Azules: proceso sin asistir. Amarillos: proceso asistido con vibraciones).

2.3. Metodología empleada para el análisis de resultados

Para evaluar los resultados de los experimentos, todas las huellas de bruñido serán adquiridas mediante un equipo de óptico basado en variación focal ALICONA Infinite Focus, registrando para cada una una superficie que incluye 6 pares de picos y valles, para obtener representatividad suficiente de la superficie completa con esa muestra. Esta dimensión de la superficie a adquirir fue establecida en fases preliminares realizadas antes de la fase de ensayo principal. Así, las superficies adquiridas fueron muestreadas, y el plano medio definido por mínimos cuadrados fue determinado para dar lugar a una distribución de alturas que define los picos y los valles que componen las huellas de bruñido.

Los datos derivados de dicha distribución de alturas se emplearon para analizar los resultados, calculando en primer lugar diferentes parámetros S , que expresan las características de la textura tridimensional, tal y como se define en la norma ISO 25178. De los posibles parámetros S , se distinguen los siguientes:

- Desviación estándar de los puntos del mapa de alturas (S_q). Este parámetro da una idea de la magnitud o escala de la superficie de alturas, de modo que a menor valor, la superficie está formada por puntos de menor separación relativa en altura.
- Skewness (S_{sk}) y kurtosis (S_{ku}) de los puntos del perfil. Estadísticos que describen la forma de la distribución de alturas. Habitualmente, se toman los valores Gaussianos como referencia ($S_{sk} = 0$ y $S_{ku} = 3$), de modo que valores de skewness menores que 0 describen superficies con supremacía de puntos de cota positiva (picos), y kurtosis menor que 3 representa superficies poco abruptas formadas por componentes periódicas de baja frecuencia (Figura 5). Las diferentes combinaciones de S_{sk} y S_{ku} dan lugar a diversas composiciones superficiales de texturas que se comportan de manera diferente ante lubricación, capacidad portante, desgaste, etc.

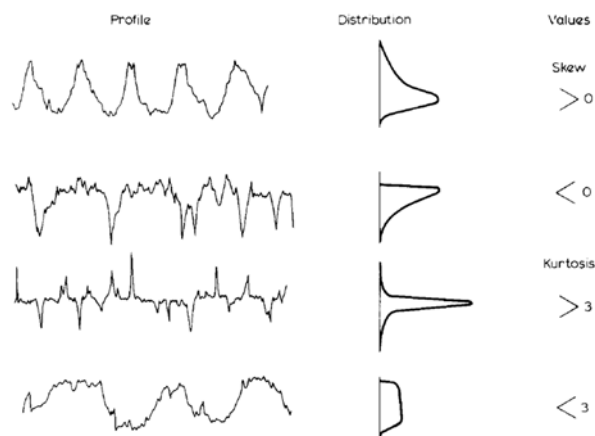


Figura 5: Representación de perfiles de rugosidad/textura típicos asociados a valores característicos de skewness y kurtosis [8].

3. Discusión de resultados

Los siguientes párrafos muestran los resultados topológicos de los ensayos realizados mediante el proceso asistido con vibraciones. El último epígrafe de esta sección presenta los resultados con el objetivo de cuantificar los efectos de la superposición de vibraciones sobre los resultados del proceso.

3.1. Características de las superficies de partida

El análisis de las topologías de partida es necesario para comprender los efectos del proceso de bruñido, dado que la interacción del material con la bola de bruñido define los resultados del proceso como tal. La Tabla 2 resume los tres principales parámetros de textura calculados sobre las tres superficies iniciales. Como puede verse, las superficies están descritas por un valor de S_q mayor, a medida que el decalaje lateral entre pasadas durante el mecanizado con fresa hemisférica aumenta. Por otro lado, todas ellas están representadas por descriptores estadísticos quasi-Gaussianos, con distribuciones de alturas equilibradas entre picos y valles, y ligeramente suavizadas en términos de alternancia relativa entre picos y valles. Por consiguiente, el factor de superficie inicial introduce en el sistema de estudio una varibilidad en la cantidad de material deformado por la bola de bruñido, no tanto en la forma en que este está distribuido en la superficie mecanizada.

Tabla 2: Descriptores estadísticos de las superficies de partida mecanizadas sobre el Ti6Al4V.

Superficie inicial	Parámetros		
	S_q (μm)	S_{sk}	S_{ku}
S^0_1	1,243	0,415	2,681
S^0_2	5,956	0,602	2,017
S^0_3	8,836	0,341	2,139

3.2. Parámetro de amplitud superficial: S_q

Para evaluar la influencia de cada uno de los factores en el valor final de S_q tras bruñir mediante el proceso VABB, se llevó a cabo un análisis de la varianza ANOVA, cuya gráfica de efectos medios se ha representado en la Figura 6. Como puede observarse, la textura inicial es el parámetro más influyente, siendo que el bruñido es capaz de obtener mejora en la superficie proporcionalmente a su estado inicial, no tendiendo en todos los casos hacia un valor único que represente el óptimo de textura mejorada por el proceso. Por otro lado, solamente la fuerza de precarga inicial es influyente en los resultados, a la vista del p-valor asociado al test. Mayores precargas dan lugar a una optimización del estado de la textura tras el proceso. Sin embargo, el avance, la estrategia, y el número de pasadas no son factores influyentes en la reducción de amplitud tras aplicar el proceso.

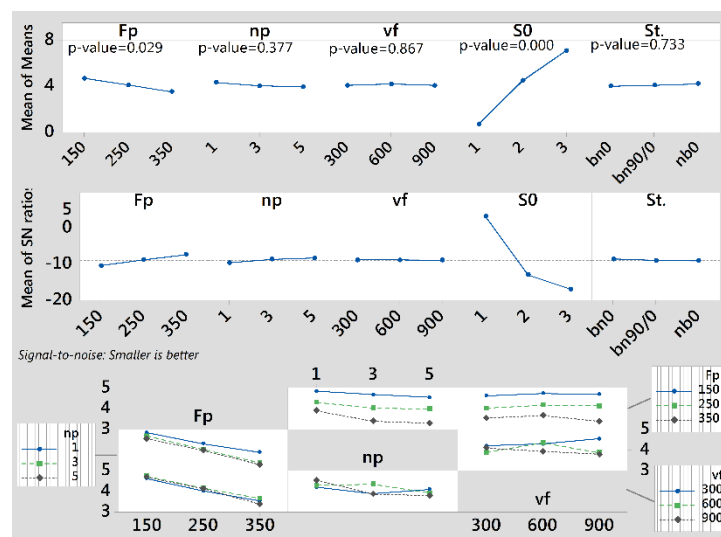


Figura 6: Gráfica de efectos medios del ANOVA, tomando como respuesta el parámetro S_q .

La reordenación de los resultados por precarga creciente para cada una de las superficies iniciales (Figura 7), lleva a concluir que, para cada superficie inicial, existe un par de valores de precarga y número de pasadas que da lugar a un resultado de máxima mejora. Este par de valores es de 350 N y 3 pasadas para la superficie S^0_1 , mientras que es de 350 N y 5 pasadas para la S^0_2 y la S^0_3 . Por tanto, a mayor tamaño de las crestas de la superficie objetivo del proceso de bruñido, más fuerzas y pasadas deben llevarse a cabo para mejorar su efecto.

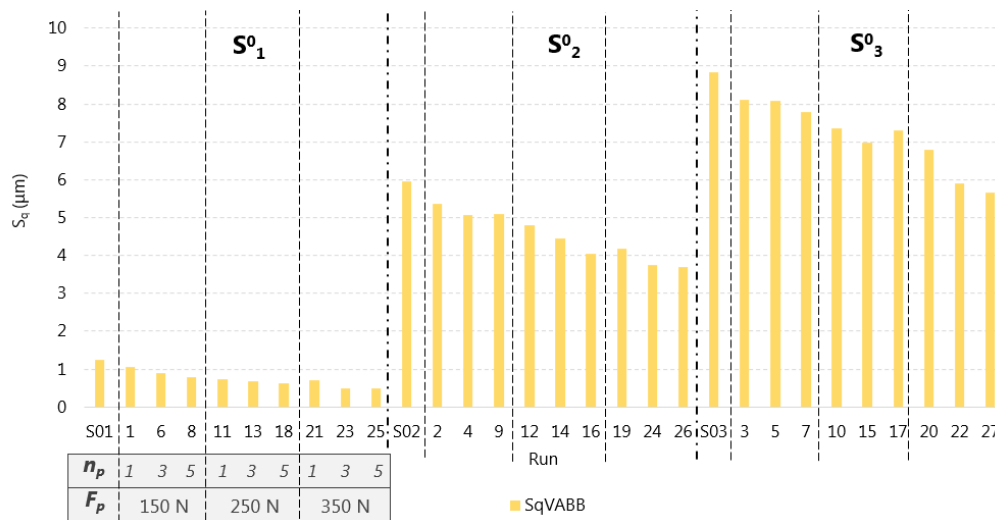


Figura 7: Evolución del parámetro S_q , ordenado por precarga creciente para cada una de las superficies iniciales.

3.3. Parámetros de distribución de alturas: S_{sk} y S_{ku}

El análisis de los parámetros de distribución de alturas se ha realizado también agrupando estos resultados según las diferentes topologías iniciales, como muestra la Figura 8. Mientras que en las superficies de mayor escala inicial, los valores de kurtosis parecen no variarse demasiado, los valores de skewness sí evolucionan hacia valores más cercanos a cero. En todo caso, la tendencia general en S^0_2 y la S^0_3 es que dichos parámetros estadísticos no cambian en gran medida. Por el contrario, los ensayos derivados de la superficie S^0_1 muestran un comportamiento diferente, en tanto que el valor de kurtosis aumenta a medida que la fuerza y el número de pasadas aumentan. El ensayo que mostró los mejores resultados en la superficie en términos de reducción de la escala (350 N y 3 pasadas), también muestra parámetros estadísticos gaussianos que explican la evolución de la distribución de alturas a medida que una mayor fuerza deforma la superficie del material. Por lo tanto, puede decirse que el proceso VABB provoca un doble efecto sobre las superficies periódicas mecanizadas con fresa hemisférica, que consiste en una disminución de la escala de sus picos y valles, a la vez que éstas se redistribuyen según una distribución gaussiana equilibrada entre picos y valles.

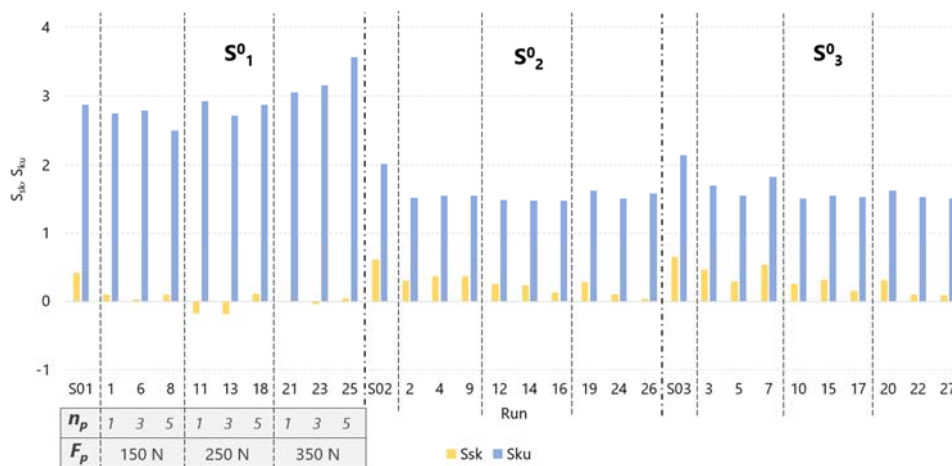


Figura 8: Evolución de los parámetros S_{sk} y S_{ku} , ordenado por precarga creciente para cada una de las superficies iniciales.

3.4. Curvas de portancia

Las curvas de Abbott-Firestone, o de portancia, muestran de forma gráfica cómo se distribuyen los puntos del perfil de alturas de una superficie, mostrándolas como una función de alturas acumuladas, que dan la cantidad de material portante que existe para cada altura de la superficie. La Figura 9 muestra cada una de estas curvas agrupadas según la superficie original. La tendencia de las curvas confirma que las superficies S^0_2 y la S^0_3 funcionan de manera similar entre ellas, y diferenciada respecto de S^0_1 , dado que la escala de la superficie se ve reducida levemente, mientras que la distribución de alturas (forma de las curvas) apenas es modificada. Sin

embargo, en los ensayos practicados sobre S^0_1 se aprecia que a medida que la fuerza y el número de pasadas aumenta, la capacidad portante de la superficie va aumentando, disminuyéndose la dimensión máxima y mínima en los picos y valles del perfil; paralelamente, las alturas se redistribuyen de forma que el ensayo con 350 N y 3 pasadas (curva naranja), da lugar a resultados similares al ensayo con misma precarga y 5 pasadas, de forma manifiesta debido a la solapación de ambas curvas. En todos los casos, esta combinación de parámetros da lugar a una maximización de la capacidad portante de la superficie.

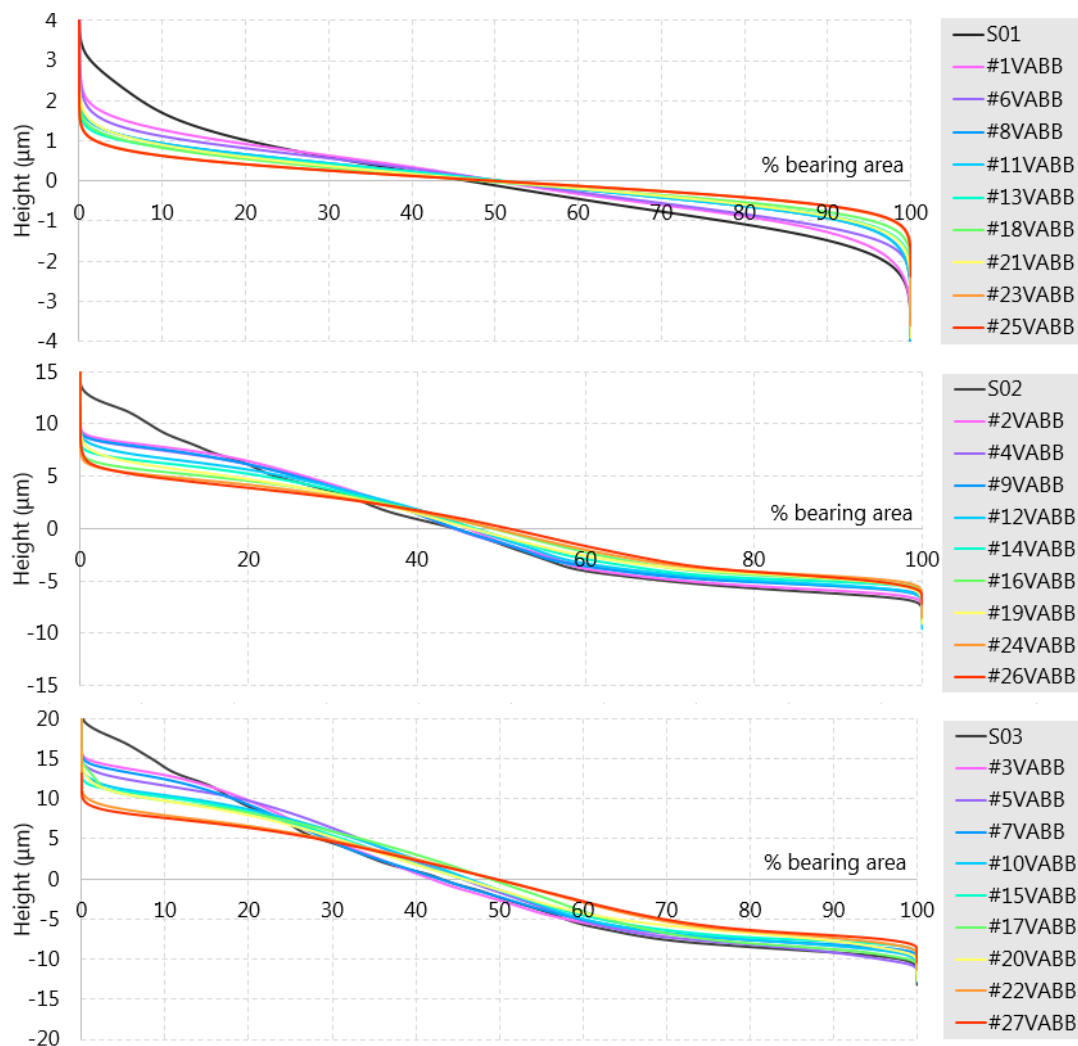


Figura 9: Curvas de portancia de las superficies de bruñido, agrupadas en función de la textura original.

3.5. Influencia de la asistencia de vibraciones sobre los resultados del proceso

La comparación directa de los valores de la desviación estándar de los puntos del perfil, entre los ensayos NVABB (no asistidos), y los VABB (asistidos por vibraciones), muestra que los valores de S_q sólo son efectivamente reducidos en mayor medida cuando se aplica el segundo, si la superficie inicial tiene una S_q menor de $1,5 \mu\text{m}$, mientras que el proceso asistido no parece introducir mejora alguna en las otras dos superficies (Figura 10). Como consecuencia, puede decirse que la interacción de la bola con el material cuando está vibrando solo tiene efectos positivos si la superficie de partida es suficientemente reducida. Esta observación es de una alta relevancia, teniendo en cuenta que permite concluir que los efectos del proceso asistido por vibraciones son altamente dependientes de la textura de partida, que debe ser suficientemente reducida como para hacer notar los efectos positivos de dicha asistencia.

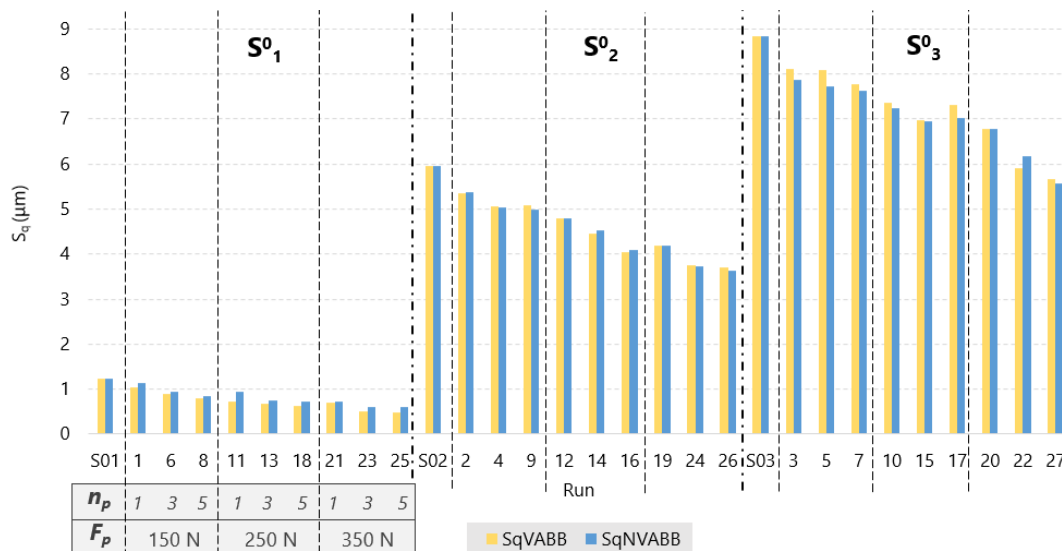


Figura 10: Comparación de los valores de S_q para los procesos ejecutados con y sin vibraciones.

4. Conclusiones

De los trabajos desarrollados, se desprenden las siguientes conclusiones relevantes con respecto al bruñido acustoplástico del Ti-6Al-4V:

1. Los efectos beneficiosos de la incorporación de vibraciones al proceso de bruñido con bola convencional son observados solo en superficies definidas por un valor de S_q inicial de en torno a 1,5 µm.
2. El bruñido asistido por vibraciones muestra un doble efecto sobre las superficies objetivo: un efecto de escala, que se manifiesta en la reducción del tamaño de los elementos que conforman el perfil de alturas, y un efecto redistributivo en el mapa de alturas, que tienden hacia valores gaussianos a medida que se llega a la aplicación de los parámetros óptimos desde el punto de vista de la topología final.
3. Las curvas de portancia, o Abbott Firestone, muestran que el valor óptimo de fuerza de precarga para aplicar el bruñido asistido por vibraciones depende de la textura inicial, y que, además, dicho valor óptimo da lugar a la distribución de alturas con máxima capacidad portante.

5. Referencias

- [1] Travieso-Rodríguez, J., Gomez Gras, G., Desein, G., Carrillo, F., Alexis, J., Jorba-Peiro, J., and Auzabac, N. "Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations on G10380 steel specimens". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**(9-12), 1757-1765 (2015).
- [2] Revankar, G. D., Shetty, R., Rao, S. S., Gaitonde, V. N. Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy. *Measurement*, **58**, 256-268 (2014).
- [3] Mordyuk, B. N., Mordyuk, V. S., Buryak, V. V. Ultrasonic drawing of tungsten wire for incandescent lamps production. *Ultrasonics*, **42**(1-9), 109-111 (2004).
- [4] Siu, K. W., & Ngan, A. H. W. Understanding acoustoplasticity through dislocation dynamics simulations. *Philosophical Magazine*, **91**(34), 4367-4387 (2011).
- [5] Gómez-Gras, G., Travieso-Rodríguez, J. A., González-Rojas, H. A., Nápoles-Alberro, A., Carrillo, F. J., & Desein, G., "Study of a ball-burnishing vibration-assisted process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **229**(1), 172-177 (2015).
- [6] Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodríguez, J. A., Gomez-Gras, G., Lluma-Fuentes, J. Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool. *Journal of Materials Processing Technology*, **257**, 203-212 (2018).
- [7] Jerez-Mesa, R., Gomez-Gras, G., Travieso-Rodríguez, J. A., Lluma-Fuentes, J. Herramienta de bruñido con bola asistida por vibraciones ultrasónicas. Publicado el 02/06/2017 en Boletín Oficial de la Propiedad Intelectual. Número de publicación: 2 615 002.
- [8] Thomas, T. Characterization of surface roughness. *Precision Engineering*, **3**(2), 97-104 (1981).