El proceso de bruñido con bola: estado del arte de una tecnología en desarrollo

Alberto Saldaña-Robles, José Ángel Diosdado-De la Peña, Antonio de Jesús Balvantín-García, Eduardo Aguilera-Gómez, Héctor Plascencia-Mora y Noé Saldaña-Robles
Universidad de Guanajuato (Méjico)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/7916

1. INTRODUCCIÓN

El bruñido con bola (**BB**) es un proceso de acabado superficial de elaboración en frío, que consiste en generar pequeñas deformaciones plásticas en la superficie de una pieza por medio del movimiento de una bola que comprime plásticamente la superficie, mejorando sus propiedades físicas y mecánicas. Este proceso utiliza como elemento deformante una bola de alta dureza, para provocar un desplazamiento de material de las crestas a los valles de las irregularidades superficiales, a través de una fuerza normal de compresión uniforme [1, 2], (Fig. 1).

El BB es un proceso altamente conocido, sin embargo, recientemente se ha incrementado su implementación como proceso de acabado de piezas mecánicas. Esto debido a que es un proceso sencillo, rápido, de bajo coste y que genera superficies de alta calidad sin consumir grandes cantidades de energía y con poca contaminación ambiental, resultando una buena alternativa a los métodos tradicionales como el rectificado y los tratamientos térmicos. Las aplicaciones más comunes del BB son la fabricación de moldes de inyección de plástico, herramentales para el conformado de metales y numerosos componentes para la industria automotriz, aeronáutica, ferrocarrilera, aeroespacial, etc. El proceso introduce tensiones residuales compresivas en la superficie de la pieza y, por lo tanto, se incrementa la resistencia al desgaste y fatiga de la misma. También, ofrece otras ventajas como: alta precisión dimensional, aumento de la vida útil de la pieza, elimina procesos secundarios costosos (rectificado, fresado de súper-acabado, etc.), incrementa la resistencia a la corrosión, corrige defectos de maquinado y es considerado como un proceso ambientalmente limpio al no generarse virutas.

Comúnmente, el elemento deformante es una esfera de diámetro entre 3 y 12 mm. La esfera tiene que ser de un material de alta dureza (diamante sintético, nitruro de titanio, acero de alta dureza, etc.) para lograr la compresión de la superficie, sin sufrir deformaciones. La profundidad optima de penetración de la bola se encuentra entre 2 y 10 µm. En las últimas décadas, diversas investigaciones se han enfocado en el estudio teórico, numérico y experimental del proceso, con la finalidad de estudiar, predecir y analizar la influencia de parámetros específicos que permitan mejorar la comprensión del proceso, así como su optimización. La mayoría de las investigaciones científicas enfocadas al BB, se han centrado en estudios experimentales para determinar cómo los parámetros iniciales del proceso (la fuerza de bruñido, avance, velocidad, diámetro de bola, lubricante, material de la bola, número de pases del bruñidor, entre otros) influyen en propiedades físicas y mecánicas del material (tensiones residuales, acabado superficial, dureza, redondez, reducción de diámetro, desgaste, etc.). En la mayoría de los trabajos revisados, por lo general, se buscó medir la integridad de la superficie mediante la rugosidad superficial media (R_a) y la dureza superficial.

El propósito de este trabajo es presentar el estado del arte basado en la revisión de diversos estudios experimentales del BB, proporcionando una visión general del avance en la investigación de este proceso de súper acabado y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas. Se presenta la introducción al proceso, se hace un desglose de los materiales de estudio y se discuten sus principales parámetros, estableciendo los rangos de valores más utilizados por los diversos autores. Se analizan también otros parámetros relevantes del proceso, tales como: el tipo de herramienta (bruñidor), la geometría de la pieza de trabajo, los diseños de experimentos abordados, el tipo de lubricante y los efectos del proceso sobre la integridad de la pieza (rugosidad, dureza, tensiones residuales, redondez y resistencia a la fatiga). Adicionalmente, se exponen de manera general algunos puntos clave del proceso, así como algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

2. MATERIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO

El BB se ha aplicado a una amplia gama de materiales para diversas aplicaciones industriales. Según los estudios revisados, el acero es el material más empleado en su estudio con un 54.3% de aplicación, le sigue el aluminio con 23.9%, después el latón con 10.9%, aleaciones de

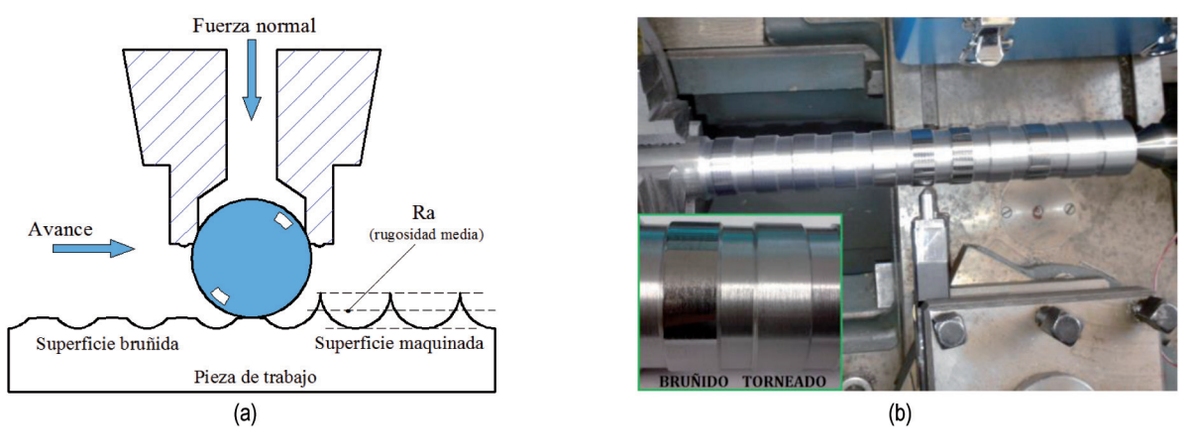


Fig. 1: Proceso de bruñido con bola, (a) esquema; (b) aplicado a una superficie torneada

titanio con 4.3% y en menor proporción, polímeros, níquel-cromo y cobre con 3.3, 2.2, 1.1%, respectivamente (ver Tabla A.1 del apartado material suplementario al final del artículo).

3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO

Los parámetros del proceso de BB que más se han estudiado, de acuerdo a Mahajan y Tajane [3] son la fuerza de bruñido ($\mathbf{F_b}$), la velocidad (**V**) y el avance (**f**) se consideran los parámetros más estudiados en un 80% de los artículos científicos, en segundo lugar, el número de pases (**n**) de la herramienta (bruñidor) y el diámetro de la bola ($\mathbf{D_b}$) con un 53%, después, el lubricante usado ($\mathbf{I_b}$) con 47% y la profundidad de bruñido ($\mathbf{P_b}$) con 20%; y en menor proporción (7%) el acabado superficial inicial ($\mathbf{R_{ai}}$), la dureza superficial inicial ($\mathbf{H_{si}}$), el material de la bola, el número de revoluciones ($\mathbf{N_r}$) ligado al diámetro de la pieza de trabajo y la dirección de bruñido. En esta clasificación de parámetros presentada, los autores consideran como variables independientes la fuerza de bruñido y la profundidad de bruñido, aun cuando son parámetros dependientes y que pueden ser considerados como el mismo. Es importante mencionar que en el análisis realizado no se hace distinción sobre los parámetros del proceso de bruñido para las diferentes maquinas-herramientas utilizadas, considerando que parámetros como F_b, f, n, I_b, D_b, P_b, R_{ai} y H_{si} son comunes tanto para torno como para fresadora, siendo únicamente V y N_r parámetros exclusivos del torno. Aun cuando en el presente estudio se consideran dichos parámetros comunes, las características de las maquinas-herramientas utilizadas pueden influir en los resultados del proceso.

3.1. FUERZA DE BRUÑIDO

La carga aplicada (fuerza de bruñido, F_b), se presenta en cuatro diferentes unidades en la literatura (kilogramo-fuerza, Newton, Pascal y Bar), de acuerdo al equipo de bruñido empleado (mecánico o hidrostático). En este trabajo, se aproximaron las unidades a Newton. Para la carga aplicada en kilogramo-fuerza, se estimó multiplicando por el valor de la gravedad. Para las cargas aplicadas como presión, diversos autores presentan expresiones para determinar la fuerza en función de algunos factores. La Ec.(1), relaciona la presión y la geometría de la bola del bruñidor [4-6]. Adicionalmente, algunos autores manifiestan que, las F_b reales son un 11% menores que las calculadas debido a pérdidas de presión entre la bola y el soporte, resultando la Ec.(2) [5, 6]. En otros estudios, se considera además de la reducción del 11% en la fuerza, que el sistema experimental tiene un ángulo de contacto de 15° entre la herramienta y la superficie normal de la pieza, la F_b puede determinarse mediante la Ec.(3) [7]. Las Ecs. (2) y (3) se usaron para obtener una estimación de la carga en Newtons, donde p, es la presión; r y d, son el radio y el diámetro de la bola.

$$F_b = \pi r^2 p \quad (1)$$

$$F_b = 0.89\frac{\pi}{4}d^2 p \quad (2)$$

$$F_b = 0.89\frac{\pi}{4}d^2 p\cos\left(\frac{\pi}{12}\right) \quad (3)$$

Las F_b aplicadas varían entre 7 y 1131 N, mientras que el 80% de los estudios se llevaron a cabo con fuerzas menores a 382N (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). La fuerza es un parámetro que afecta a la rugosidad, en diversas investigaciones se puede apreciar que, si la fuerza incrementa, la rugosidad disminuye. Sin embargo, existe un valor límite de fuerza, que si se sobrepasa se genera una huella (deterioro plástico) del ancho de contacto de la bola con la superficie, ocasionando una mayor deformación plástica y acumulación o apilamiento de material, lo cual produce un incremento en la rugosidad final. El contraste en los resultados analizados puede atribuirse a características mecánicas del material que se está bruñendo, por ejemplo, el coeficiente de auto-endurecimiento, que determinará si el material se apila o se hunde y que además está relacionado con el ancho de pasada lateral [8]. Por otro lado, un incremento en la F_b aumentará la dureza.

En los estudios revisados se establece que F_b es un parámetro fundamental con la mayor contribución (42.9% y 71.6%, respectivamente) en la mejora de la calidad superficial (dureza y rugosidad) al ser comparada la fuerza con otros factores, ver Fig. 2.

En la literatura se corrobora lo anterior: altos valores de F_b producen menor rugosidad y mayores tensiones residuales de compresión en la superficie. Recientes estudios presentan el desarrollo de nuevos mecanismos tales como bruñidores asistidos por vibraciones [1], que permiten mejorar el control de F_b.

3.2. AVANCE DE BRUÑIDO

El avance de bruñido varía entre 0.01 y 0.80 mm/rev (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). Sin embargo, más del 84% de los avances utilizados entran en el rango de 0.01 a 0.27 mm/rev. y por arriba del 95% se encuentran de 0.01 a 0.41 mm/rev. Diversos autores presentan que bajos avances generan una disminución en la rugosidad. Otros autores muestran el mismo comportamiento, pero manifiestan un valor límite de avance el cual ocasiona un aumento en la rugosidad (entre 0.1-0.25 mm/rev.). Este límite depende de las condiciones del proceso y del material. Con altos avances, el bruñidor crea marcas consecutivas con una distancia grande, en comparación con el área de contacto entre la bola y la pieza, y por lo tanto, se obtiene una mayor rugosidad de la superficie. Para evitar lo anterior, el valor del

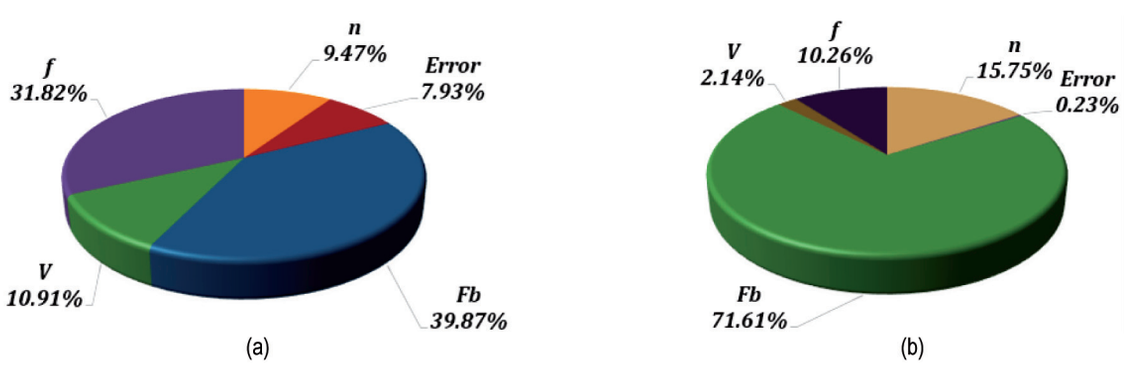


Fig. 2: Parámetros que contribuyen en la mejora de la calidad superficial; (a) [9]; (b) [10]

avance debe ser menor que la longitud de la zona de contacto, se recomienda superposición (traslape de la huella de bruñido) y bajas velocidades de avance en función del diámetro de la bola. Adicionalmente, utilizar F_b altas (cercanas al valor crítico) con bajos avances se reducirá la rugosidad superficial de la pieza de trabajo.

Hay autores que declaran que el avance es un factor que mejora la rugosidad, sin embargo, otros mencionan que la rugosidad es poco sensible a este parámetro, pero que su aumento reduce la eficiencia del bruñido.

En algunos estudios se afirma que al incrementar el avance la dureza disminuye, sin embargo, para otros autores este parámetro no es significativo. Lo anterior se debe a que avances altos en piezas cilíndricas producen una compresión no uniforme en la superficie, obteniendo un promedio de dureza de zonas bruñidas y no bruñidas.

3.3. VELOCIDAD DE BRUÑIDO

La máxima velocidad en que se llevó a cabo el proceso de bruñido en la literatura (velocidad rotacional de la pieza) fue de 158 m/min (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). Aproximadamente el 70% de las velocidades presentadas en los distintos trabajos son menores a los 53 m/min. En algunos estudios, en lugar de la velocidad tangencial se reporta la velocidad angular de bruñido en revoluciones por minuto (rpm).

$$v = \omega r \qquad (4)$$

La conclusión de varios estudios es que al incrementar la velocidad, la rugosidad disminuye. Sin embargo, por arriba de cierto valor la rugosidad tiende a incrementar. El valor límite presentado en la literatura varía entre 1.5 m/s hasta los 60.3 m/s. La variación presentada en este límite se debe al tipo de material y las diferentes magnitudes de los parámetros utilizados.

Se ha encontrado que a medida que la velocidad aumenta, incrementa la rugosidad; sin embargo, en otros análisis este parámetro no representa un efecto significativo. Finalmente, en algunos estudios, se demuestra que, para cierto rango, al incrementar la velocidad la dureza incrementa, sin embargo, a más de 10 m/min la dureza superficial de la pieza bruñida comienza a disminuir. Dicho fenómeno es atribuible al proceso de descamación antes mencionado, ocasionado también por F_b y un excesivo número de pases.

3.4. DIÁMETRO DE LA BOLA Y MATERIAL

Los diámetros de bola (D_b) más empleados en los estudios analizados fueron 10 mm (20.5%), 6 mm (13.7 %) y 8 mm (9.6%), ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO. Se analizaron D_b desde 3 hasta 20 mm, encontrando que el cambio del tamaño de la bola tiene un efecto sobre la rugosidad superficial y la dureza. Los diámetros grandes tienen una menor penetración sobre la pieza de trabajo en función de F_b. Por ejemplo, una bola de 10 mm proporciona una mejora de la rugosidad, debido a una mayor área de contacto sobre la superficie, generando un mayor traslape en la huella de bruñido en comparación con bolas de menor diámetro para las mismas condiciones del proceso. Una bola de 6 mm mejora la dureza debido a que con una misma fuerza de bruñido se tendrá una mayor penetración, lo que ocasionará una mayor compresión de la capa superficial del material. En algunos trabajos se analizaron diámetros de 10, 13, 16, 18 y 20 mm, encontrando que al disminuir D_b disminuye la rugosidad superficial e incrementa la dureza en la pieza.

Por otro lado, se encontró que a medida que aumenta D_b (de un valor de 3 a 6 mm) se obtiene una mejora en el acabado superficial. Del análisis realizado se puede determinar que el incremento en D_b requiere una mayor F_b para lograr valores de rugosidad aceptables.

3.5. NÚMERO DE PASADAS

Los números de pasadas (n) más estudiados son 2 y 3 en cerca de 40% de los estudios. El máximo n reportado fue de 7 (ver Fig. A.1 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). A medida que aumenta n, la rugosidad superficial disminuye, proponiéndose generalmente de 1 a 4 pasadas. Existe un n óptimo que es dependiente del material estudiado y los parámetros del proceso (generalmente de 2 a 4 pases), que si se sobrepasa, la rugosidad incrementa nuevamente. Se atribuye este efecto al endurecimiento excesivo de la capa superficial debido a la compresión; sobrepasando el valor óptimo de pases se produce una descamación superficial de la pieza.

Diversos autores señalan que el incremento de n aumenta la dureza superficial. Los autores de la literatura revisada concuerdan que n es un factor importante que afecta la rugosidad y dureza de la superficie. Se establece que, una baja velocidad (15 m/min) o bajo avance (aproximadamente 0.015 mm/rev.) aunado a un alto n (entre 4 y 5) conduce a una mejora sustancial en la rugosidad. Mientras que una alta velocidad o alto avance combinados con un elevado n deteriora la rugosidad, debido a la descamación antes mencionada.

En la literatura se determina que n es el segundo factor con mayor influencia sobre el proceso con un 15.75%; afectando también significativamente la rugosidad.

4. TIPO DE BRUÑIDOR Y MATERIAL DE BOLA

Algunos autores de la literatura revisada reportan dos tipos de mecanismos

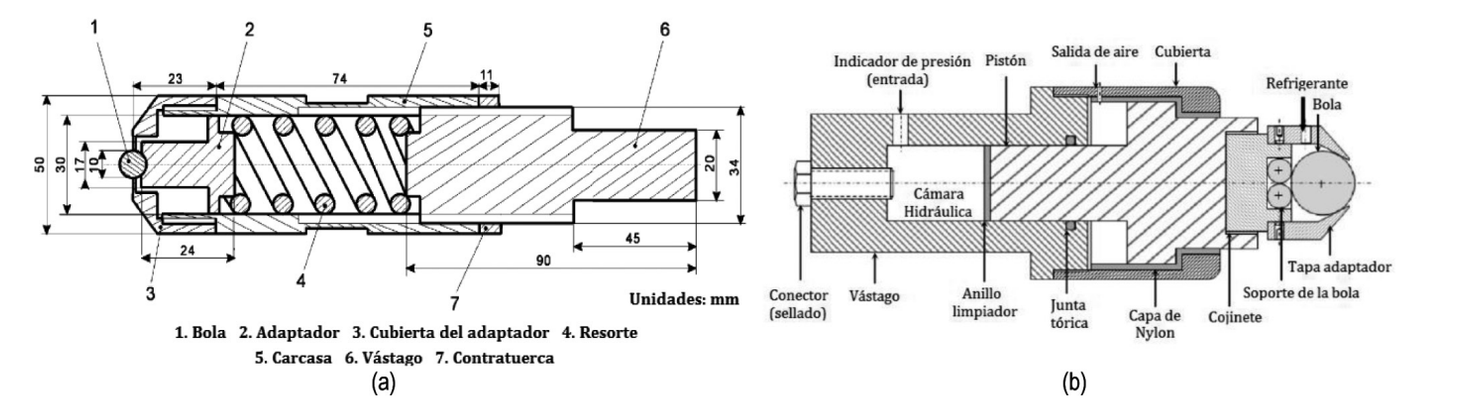


Fig. 3: Equipos para el bruñido con bola; (a) resorte mecánico [12]; (b) muelle hidrostático [13]

comúnmente usados para el proceso de bruñido con bola, el mecanismo por resorte mecánico, ver Fig. 3(a), así como el mecanismo de muelle hidrostático, ver Fig. 3(b). Siendo el equipo con resorte el más utilizado en aproximadamente un 59% de la totalidad de los estudios revisados.

En las investigaciones realizadas con muelle hidrostático, las herramientas más utilizadas incluyen diámetros de bola de 6 mm y 13 mm, mientras que en los estudios con resorte mecánico, los propios investigadores desarrollaron su herramienta de bruñido con bola. Autores como [9] emplearon una herramienta de bruñido especial, consistente en un arreglo circular de tres bolas independientes, orientadas a 120°; que pueden activarse para trabajar 1, 2 o 3 bolas a la vez. Actualmente, estudios del proceso de bruñido con bola proponen la utilización de nuevos desarrollos, como el uso de un bruñidor asistido por vibración [8], el cual tienen un mejor control de la fuerza de bruñido y un mejor desempeño con respecto al número de pases en comparación con el bruñidor convencional. También se ha desarrollado una herramienta de bruñido con doble bola que permite bruñir piezas cilíndricas a la par del proceso de torneado, es decir, realiza ambos procesos al mismo tiempo sin necesidad de cambiar las herramientas, lo que permite optimizar el tiempo del proceso de manufactura [11]. Este tipo de herramientas se han utilizado tanto en torno convencional y CNC, como en fresadoras-CNC. El material más empleado para la fabricación de la bola en los diversos estudios es el acero con recubrimiento de cromo, de nitruro de silicio (Si_3N_4) y nitruro de titanio (ver Tabla A.2 del MATERIAL SUPLEMENTARIO).

5. GEOMETRÍA DE LA PIEZA DE TRABAJO

El análisis del proceso de bruñido con bola se ha llevado a cabo en diferentes geometrías, siendo las barras cilíndricas las más estudiadas (ver tablas A.3 y A.4 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). La rugosidad y la dureza son dos de los parámetros más utilizados para determinar la integridad superficial de la pieza. En el 58% de los estudios se utilizaron barras cilíndricas, en 9% bloques rectangulares y en 7% moldes; en menor porcentaje el bruñido se estudió en superficies convexas, cóncavas, inclinadas, etc. Para barras cilíndricas se emplearon diámetros y longitudes en los rangos de 12.4-80 mm y 40-400 mm, respetivamente. Las barras cilíndricas se seccionaron para llevar a cabo las pruebas experimentales de bruñido a diversas condiciones.

6. TIPO DE LUBRICANTE

Los lubricantes más empleados en el proceso de bruñido son el aceite soluble, el keroseno y los aceites SAE (ver Tabla A.5 del MATERIAL SUPLEMENTARIO). En un estudio se analizó el efecto de cuatro lubricantes, encontrando que a diferentes valores de fuerza, velocidad y avance el keroseno brindó un mejor acabado superficial que el aceite SAE-30 puro y con 5 y 10% de grafito. En otros estudios se consideraron tres tipos de lubricantes, concluyendo que el bruñido empleando grasa permite obtener una mayor dureza que el keroseno y el lubricante mixto.

7. EFECTOS DEL PROCESO DE BRUÑIDO SOBRE LA PIEZA

7.1. TENSIONES RESIDUALES

Diversos investigadores presentan que las tensiones residuales después del proceso de bruñido con bola son del tipo compresivas. Estas tensiones de compresión son la clave para mejorar la resistencia al desgaste, fatiga y corrosión de las piezas bruñidas. En la mayoría de los estudios, las tensiones más altas se presentan en la superficie y disminuyen al incrementar la profundidad de la pieza, existiendo una profundidad en donde cambian de negativas a positivas. La Fig. 4a muestra el diagrama de la distribución de la tensión residual del bruñido, donde: 1) bola; 2) superficie antes del bruñido; 3) superficie después del bruñido; 4) tensión residual compresiva; A) región de presión; la bola entra en contacto con la superficie de la pieza y la presión incrementa de forma progresiva; B) región de deformación plástica; la presión de contacto excede el límite elástico del material y causa una deformación plástica local; C) región de suavizado; D) región de compresión; el material es comprimido por la acción de la bola; E) distorsiones elásticas; después de pasar la bola, el material sufre una recuperación elástica.

La técnica experimental más usada en los estudios de bruñido para cuantificar las tensiones residuales, es la técnica de difracción de rayos X (DRX). Ésta permite medir el campo de tensiones en la superficie o cerca de ella. Las tensiones residuales medidas, generalmente son axiales y tangenciales a diferentes profundidades de la pieza bruñida. La distancia en que se encuentran las tensiones residuales compresivas varía entre 0.4 y 2 mm desde la superficie. En la Fig. 4b, se muestra la tendencia típica de las tensiones residuales después del bruñido con bola.

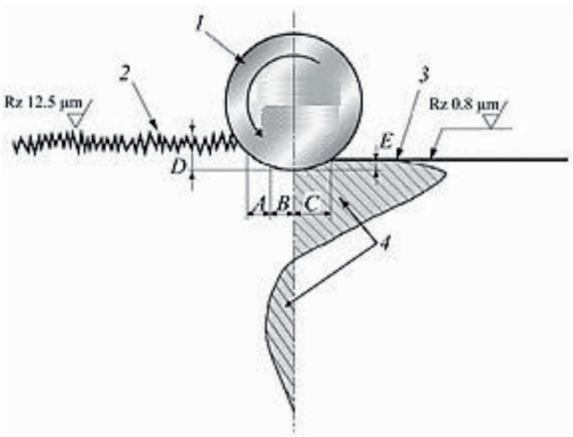
7.2. PORCENTAJE DE LA MEJORA DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y LA DUREZA

El análisis de la literatura muestra que el proceso de bruñido con bola mejora la rugosidad de piezas pre-mecanizadas incrementando su dureza. En los diversos estudios analizados en este trabajo para el caso de metales se presentan mejorías en el acabado superficial entre el 40% y 95% de los mismos; mientras que para la dureza entre 17% y 60%. Sin embargo, en otras investigaciones se estudió la aplicación del proceso a diversos tipos de polímeros encontrando que la rugosidad superficial se ve afectada, mientras que la dureza es un parámetro poco afectado.

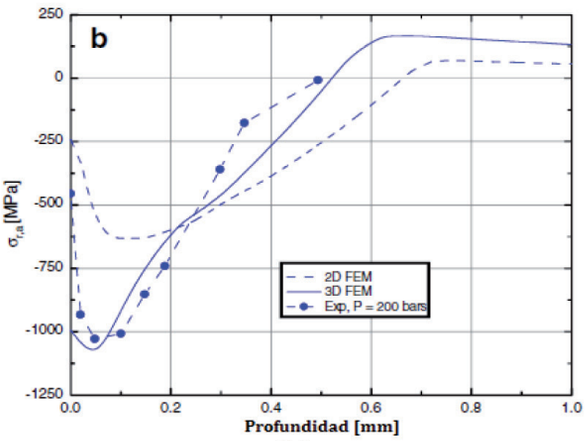
7.3. REDONDEZ DE LA SUPERFICIE

La redondez es una tolerancia geométrica relevante para el montaje de una pieza mecánica, obtenido como la diferencia entre el radio máximo y mínimo del perfil medido. El concepto de fuera de redondez depende de la tolerancia requerida, variando considerablemente para cada aplicación. Un error de redondez es considerado como uno de los errores geométricos más comunes en componentes cilíndricos, ya que tiene efectos negativos sobre la precisión y otros factores importantes como el desgaste en elementos rotativos. Además, se sabe que la deformación plástica tiene lugar en la superficie durante el proceso de bruñido, lo cual es una de las causas de la variación en la redondez.

En dos trabajos se midió la redondez antes y después del bruñido con bola, utilizando la media aritmética de 3 lecturas para obtener mejores resultados. En uno de estos trabajos, la combinación de parámetros que permitieron obtener la menor fuera de redondez (cercana a cero) fueron una velocidad de 1 m/s, un avance de 0.12 mm/rev. y una fuerza de bruñido de 150 N. Mientras que en el otro, se encontró que una disminución tanto en la velocidad de bruñido (15 m/min) como en el avance (0.58 mm/rev) conduce a una disminución (cercana a cero) de la fuera de redondez. Sin embargo, si la velocidad se mantiene constante y se incrementa el avance (2.32 mm/rev.), se tiene un incremento de la fuera de redondez (arriba de 20 µm). Por otro lado, la fuera de redondez cercana a cero se obtiene a partir de combinaciones de otros parámetros del proceso, tales como: el número de pases (4-5) y



(a)



(b)

Fig. 4. (a): Diagrama de la distribución de la tensión residual del bruñido [14]; (b) comportamiento típico [5]

un avance de 0.015 mm/rev.; una profundidad de penetración de 0.025 mm y un avance de 0.015 mm/rev. Finalmente, un valor mínimo de fuera de redondez cercano a 10 µm se obtuvo con 4 pases y una profundidad de penetración entre 0.025 a 0.035 mm.

7.4. CARACTERÍSTICAS DE FRICCIÓN Y DESGASTE

En la literatura se propuso el diseño y construcción de un disco para pruebas de desgaste. En este estudio se revelo que al aumentar la velocidad de rotación del disco, se incrementa la pérdida de peso. Lo anterior, al considerar que la fuerza de contacto se mantiene constante. El mismo efecto se presenta si la fuerza de bruñido se incrementa y la velocidad se mantiene constante. Si se incrementa la fuerza o el número de pases de bruñido a ciertos límites, se obtiene una mayor resistencia al desgaste.

En otro estudio se realizaron pruebas tribológicas obteniendo una disminución sustancial en el coeficiente de fricción y la pérdida de peso bajo la condición de contacto lubricado. Los autores obtuvieron una reducción del 46% en el coeficiente de fricción cuando el deslizamiento se realizó en la dirección paralela a la orientación del bruñido.

Otros autores evaluaron las características de fricción en términos del coeficiente de fricción mediante el deslizamiento de dos polímeros, polioximetileno (POM) y poliuretano (PUR), sobre acero inoxidable. Se observó que el coeficiente de fricción disminuyó inicialmente con el aumento de la fuerza de bruñido, alcanzando hasta 33% y 29% de reducción para POM y PUR, respectivamente, ambos a una fuerza de bruñido de 124 N. Si se incrementa el valor de la fuerza de bruñido, el coeficiente de fricción incrementa. Un comportamiento similar se presenta para la velocidad, el avance y el diámetro de la bola.

7.5. EFECTO SOBRE EL COMPORTAMIENTO A FATIGA

Diversos estudios han investigado el efecto del bruñido con bola sobre la resistencia a la fatiga, demostrando que el proceso incrementa esta característica. En la literatura, se manifiesta que el bruñido con bola provoca tres efectos principales que incrementan la resistencia a la fatiga (incremento de la dureza, tensiones residuales compresivas y acabado superficial de alta calidad). En uno de los estudios revisados, se realizaron pruebas de fatiga por flexión rotativa en probetas de acero AISI-1045. La resistencia a la fatiga en las probetas tratadas con bruñido mejora de $3x10^4$ a $1x10^6$ ciclos, el límite de fatiga por flexión incrementó en un 21.25%, se obtuvo un acabado superficial de alta calidad (reducción del 50% del tamaño de grano superficial) y un incremento entre el 20% y 25% de la dureza superficial HBN, todo esto en comparación con las probetas no bruñidas.

También se reporta la realización de pruebas de fatiga rotativa en aluminio AA5083 encontrando que el bruñido con bola mejora la resistencia a la fatiga del material hasta en un 100% (en aire y en ambiente corrosivo) respecto a una pieza sin tratamiento. De manera similar, se realizaron pruebas en probetas de acero inoxidable 15-5PH, donde el bruñido con bola incrementó la resistencia a la fatiga hasta un 25%, en condiciones de altas tensiones residuales y baja rugosidad.

En uno de los estudios revisados, se llevaron a cabo ensayos de fatiga a tracción en probetas de superficie plana de acero AISI 1010, con y sin tratamiento de bruñido con bola. Los autores de este trabajo demostraron que, para las condiciones y el tipo de material empleado en el estudio, el bruñido con bola no presentó un efecto representativo sobre la resistencia a la fatiga. Adicionalmente, se realizaron pruebas a tracción de probetas bruñidas mejorando la ductilidad del material en un 49%. El aumento puede deberse a que el proceso de bruñido con bola mejora el acabado de la superficie, eliminando también micro-fisuras en los bordes de la muestra disminuyendo significativamente los defectos en la superficie en donde pueden iniciarse grietas.

De acuerdo a la literatura revisada, el proceso de bruñido con bola permite mejorar la resistencia del material en probetas sometidas a pruebas de fatiga rotativa; mientras que para pruebas de fatiga a tracción no puede hacerse la misma aseveración.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo una revisión de diversos estudios experimentales del proceso de bruñido con bola. El análisis realizado proporciona una visión general del estado del arte de este proceso de mejoramiento de propiedades físico-mecánicas, así como de los parámetros y consideraciones utilizadas por diversos autores. Las investigaciones experimentales para materiales específicos se enfocan al estudio de como los parámetros de fuerza de bruñido, avance, velocidad, diámetro de bola, lubricante, material de la bola, número de pases, entre otros; influyen en el acabado superficial, dureza, redondez, reducción de diámetro, desgaste, etc., en función de optimizar el bruñido con bola. De manera general a continua-

ción se exponen algunos puntos clave del proceso de bruñido con bola, así como también algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Esto para los materiales, los parámetros y su rango de valores, el tipo de máquina-herramienta, etc., que fueron descritos en este trabajo.

1. El proceso de bruñido con bola puede mejorar el acabado superficial entre el 40% y 95%; mientras que la dureza puede incrementar entre el 17% y 60%.
2. Los parámetros de mayor influencia sobre la integridad superficial de piezas bruñidas con bola son la fuerza de bruñido, el avance y el número de pases.
3. Un análisis de las magnitudes de los parámetros de mayor influencia del proceso, de acuerdo a los autores de la literatura revisada, muestra que la integridad superficial de una pieza puede mejorar significativamente al utilizar fuerzas de bruñido menores a 382 N, avances entre 0.01 y 0.27 mm/rev, así como un número de pases entre 2 y 4.
4. Los autores del presente trabajo recomiendan utilizar combinaciones entre los parámetros de mayor influencia: fuerzas altas entre 288 N y 382 N, con bajas velocidades de avance de 0.01 mm/rev a 0.14 mm/rev y un número de pases entre 2 y 3. Lo anterior, para obtener una mejora sustancial en la integridad superficial de la pieza.
5. De acuerdo a los estudios revisados el parámetro velocidad de bruñido no contribuye significativamente en la mejora de la integridad superficial. Por lo que se pueden seleccionar altas velocidades (cuidando el aumento de temperatura por alta velocidad), de acuerdo al tipo de máquina-herramienta y materiales utilizados, de manera que disminuya el tiempo del proceso.
6. Aproximadamente el 80% de los estudios analizaron el proceso de bruñido con bola en diversos aceros y aleaciones de aluminio. Siendo las principales aplicaciones moldes de inyección de plástico, herramentales de corte y estampado, piezas automotrices, aeronáuticas y aeroespaciales. Sin embargo, la aplicación del proceso de bruñido con bola se ha extendido hacia otros materiales con creciente interés industrial tales como: aleaciones de titanio, níquel-cromo-molibdeno y diversos polímeros.
7. Generalmente, el bruñido con bola se lleva a cabo con mecanismos de resorte e hidrostáticos; sin embargo, recientemente se ha desarrollado nuevas herramientas que permiten mejorar el proceso tales como: el bruñidor asistido por vibración y bruñidores de bolas múltiples.
8. Los diversos estudios demuestran que el bruñido con bola permite inducir tensiones residuales compresivas; las cuales incrementan la resistencia a la fatiga de las piezas. La técnica más utilizada para cuantificar estas tensiones residuales, es el método de difracción de rayos X (DRX).

Se puede observar una discrepancia entre los resultados de diferentes autores, pero es importante mencionar que las diferencias se deben a los rangos de magnitud de los parámetros estudiados, a las diferentes propiedades mecánicas del material de estudio, así como al tipo de máquina-herramienta utilizada. Lo anterior, provee un área de oportunidad para la investigación experimental de este proceso, a través del diseño de nuevos equipos que permitan mejorarlo y reducir costos, así como, el estudio del proceso sobre nuevos materiales de interés industrial.

PARA SABER MÁS

[1] Rodríguez-Ezquerro A, López de-Lacalle LN. *Tratamientos mecánicos superficiales para mejora de piezas mecanizadas: Bruñido con Bola.* 1a-Edición. Editorial-Académica-Española,-2012.-ISBN:9783659064906.

[2] Travieso-Rodriguez JA, Gomez-Gras G, Dessein G, et-al. "Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.-May-2015.-Vol.81(9-12).pp.1757-1765. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7255-3).

[3] Mahajan D, Tajane R. "A Review on Ball Burnishing Process". International Journal of Scientific and Research Publications.-April-2013.-Vol.3-4.pp.1-8.

[4] Yen YC, Sartkulvanich P, Altan T. "Finite element modeling of roller burnishing process". CIRP Annals-Manufacturing Technology.-December-2005. Vol.54-1. pp.237-240.(DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60092-4).

[5] Sayahi M, Sghaier S, Belhadjsalah H. "Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. July 2013. Vol.67-5. p.1665-1673. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4599-9).

[6] Sartkulvanich P, Altan T, Jasso F, et-al. "Finite element modeling of hard roller burnishing: an analysis on the effects of process parameters upon surface finish and residual stresses". Journal-of-Manufacturing-Science-and-Engineering.-February-2007.-Vol.129-4.pp.705-716.-(DOI: http://dx.doi.org/10.1115/1.2738121).

[7] Celaya AN, De Lacalle LL. "Modelo de elementos finitos del bruñido con bola". 9º Congreso-Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Las Palmas de Gran Canarias:2009.

[8] Gomez-Gras G, Travieso-Rodriguez JA, Jerez-Mesa R. "Experimental Characterization of the Influence of Lateral Pass Width on Results of a Ball Burnishing Operation".-Procedia-Engineering.-December-2015.-Vol.132.pp.686-692.(DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.548)

[9] El-Taweel TA, El-Axir MH. "Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.-March-2009.-Vol.41-3.pp.301-310.-(DOI: http://dx.doi.org/1007/s00170-008-1485-6)

[10] Esme U. "Use of grey based Taguchi method in ball burnishing process for the optimization of surface roughness and microhardness of AA 7075 aluminum alloy". Materials and Technology.-March-2010.-Vol.44-3.pp.129-135.

[11] Chaudhari P, Awari GK, Khandare SS. "Investigation of effectiveness of combined turning and burnishing operations performed on lathe machine on an aluminium alloy for the modification of surface texture". International Research Journal of Engineering and Technology. September 2015. Vol.2. p.1316-1320.

[12] Shiou FJ, Chen CH. "Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process". Journal of Materials Processing Technology. September 2003. Vol.140-1. p.248-254. (DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00750-7).

[13] Low KO, Wong KJ. "Influence of ball burnishing on surface quality and tribological characteristics of polymers under dry sliding conditions". Tribology International. February 2011. Vol. 44-2. p.144-153. (DOI:10.1016/j.triboint.2010.10.005).

[14] Akkurt A. "Comparison of roller burnishing and other methods of finishing treatment of the surface of openings in parts from tool steel D3 for cold forming". Metal Science and Heat Treatment. July 2011. Vol.53(3-4). p.145-150. (DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s11041-011-9358-2).

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/7916-1.pdf