



## CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESGASTE RADIAL DE MUELAS DE RECTIFICADO CON AGLOMERANTE VÍTREO

T. PAZMIÑO FRANCO, I. POMBO RODILLA, J.A. SÁNCHEZ GALÍNDEZ, L. GODINO FERNÁNDEZ

Universidad del País Vasco  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Ingeniero Torres Quevedo Plaza, 1, CP 48013 Bilbao, Vizcaya, España

*(Recibido 15 de septiembre de 2020, para publicación 7 de enero de 2021)*

**Resumen** – El rectificado supone una de las operaciones de mayor valor añadido en la fabricación de componentes mecánicos. Se trata de una operación de acabado en la que se consiguen tolerancias dimensionales y acabados superficiales que no pueden alcanzarse mediante otros procesos de fabricación. Esta operación permite obtener una excelente vida a fatiga del componente, y es por ello que su presencia es muy importante en componentes de alta tecnología para aeronáutica, automoción, óptica, etc. La herramienta, la muela abrasiva, es un composite que sufre desgaste durante su interacción con la pieza. El desgaste provoca pérdida de tolerancias y de acabado superficial, afectando por tanto a la viabilidad de la operación. Incluso, puede llevar a daños que afecten muy negativamente al comportamiento a fatiga del componente. Dado que la fabricación de la muela abrasiva es muy artesanal, y que el fabricante de la misma no dispone de datos sobre las características mecánicas del abrasivo y del aglomerante, el estudio de los fenómenos de desgaste se basa tradicionalmente en esquemas de prueba-error. Este trabajo es el primer paso para el posterior desarrollo de modelos numéricos y de nuevos ensayos experimentales que permitan caracterizar el comportamiento a fractura de la muela abrasiva como composite. Previamente, es necesario obtener relaciones entre la pérdida de geometría de la muela abrasiva y las fuerzas, energía específica de corte y acabado superficial final de la pieza. En este trabajo se presenta una metodología experimental para la cuantificación del desgaste. Tras describir los ensayos, los mismos se llevan a cabo en una rectificadora industrial sensorizada y utilizando muela abrasiva de alúmina. A continuación se discute la evolución de fuerzas, energía específica de corte y acabado superficial con el desgaste bajo diferentes condiciones de rectificado. Los resultados revelan que no es posible estudiar el comportamiento de fractura de la muela abrasiva si el fenómeno de pérdida de granos abrasivos no está aislado. El desgaste de la muela abrasiva ha aumentado, al incrementar el volumen de pieza rectificado, sin embargo, con las pruebas realizadas, los granos abrasivos no han llegado a desprenderse del aglomerante, por lo que se establecen acciones para poder aislar dicho fenómeno en futuros ensayos. En los ensayos preliminares, a medida que se incrementa la velocidad de avance, la energía específica de corte disminuye y Ra aumenta, en cambio en el desgaste volumétrico no existe una clara tendencia. En los ensayos de caracterización, se puede observar dos tendencias de desgaste de la muela abrasiva. El cambio de tendencia provoca un aumento de la energía específica y de Ra. Estos resultados presentados en este artículo permitirán posteriormente validar los modelos numéricos sobre los que ya se ha empezado a trabajar.

**Palabras clave** –Rectificado, granos abrasivos, desgaste, alúmina, aglomerante vítreo, muelas de rectificado.

### 1. INTRODUCCIÓN

El rectificado es un proceso de mecanizado que se encuentra dentro de las últimas etapas de fabricación de piezas de alta precisión y gran acabado superficial. El proceso de rectificado emplea una muela abrasiva girando a alta velocidad para eliminar material [1]. La muela abrasiva es una herramienta de corte de precisión que esta compuesta de granos abrasivos, aglomerante y poros, cuyas formas se adaptan al proceso de rectificado establecido.

Las muelas abrasivas generalmente están compuestas de dos materiales: pequeñas partículas abrasivas llamados granos abrasivos, que cortan, y un aglomerante para mantener los granos abrasivos juntos en una masa sólida. El arranque de material se logra mediante la acción de los granos abrasivos sobre la pieza de trabajo. Existen seis tipos generales de materiales de unión para muelas abrasivas convencionales

que son: resinoide (incluso reforzado), laca, oxiclورو, caucho (incluido reforzado), silicato y vitrificado. La mayoría de las muelas abrasivas convencionales tienen enlaces vitrificados [2]. Las muelas abrasivas de alúmina vitrificada representan casi el 50% de todas las muelas abrasivas manufacturadas, considerándose probablemente la más importante. Los enlaces vitrificados se componen esencialmente de vidrios que se forman cuando el componente cerámico, arcillas, feldespatos y bórax, se consolidan a altas temperaturas [3]. Los aglomerantes vitrificados se caracterizan por su estabilidad a altas temperaturas, fragilidad, rigidez y su capacidad para soportar altos niveles de porosidad en la estructura de la muela abrasiva [1]. Además, permiten caracterizar la topografía de la muela abrasiva [4].

El contacto entre pieza y muela abrasiva durante el proceso se caracteriza por unas muy elevadas presiones (1-2GPa) y altas velocidades relativas (>30m/s). Esto conduce a un desgaste progresivo de la muela abrasiva que hace que ésta, pierda su capacidad de corte. Dicho desgaste afecta la calidad final de las piezas, provoca pérdida de tolerancias dimensionales y conduce al cambio de parámetros del proceso, afectando la viabilidad de la operación y que si las fuerzas de rectificado exceden, pueden provocar daños que afecten muy negativamente el comportamiento a la fatiga de la pieza [5]. Los tipos de desgaste que puede sufrir una muela abrasiva son tres: una variación en la superficie de la muela abrasiva a nivel macrogeométrico, una pérdida de redondez o aparición de un salto radial y una pérdida de capacidad de corte. Este último tipo de desgaste se da mayoritariamente en operaciones de rectificado plano y se origina de tres maneras que son: granos aplanados, rotura de grano y desprendimiento de grano [2].

En la actualidad, el fabricante no dispone de datos sobre las características mecánicas del abrasivo y del aglomerante por lo que, cuando la muela abrasiva no trabaja correctamente, se procede al cambio de su composición debido a la experiencia del fabricante. Es por esto, que este estudio se centraría en el análisis del desgaste volumétrico de la muela abrasiva.

Herman y Markul [6], han realizado estudios en donde indican que con la aparición de fases cristalinas en el aglomerante permite que durante el rectificado, los mecanismos de desgaste sean iguales a los granos submicrocristalinos, mejorando el desgaste radial de la muela abrasiva, el *G-ratio* y  $R_a$ . Parámetros que no solo dependen del aglomerante sino de los granos y la velocidad de rectificado. Ambos autores han realizado ensayos experimentales para analizar el desgaste radial, el *G-ratio* y  $R_a$  y como muy probablemente se forman grietas transcristalinas en la superficie de la muela abrasiva durante el proceso, es decir, grietas en granos y aglomerante. En este artículo, mencionan el Brazilian test que es un ensayo de compresión que muy probablemente pueda caracterizar el comportamiento a la fractura de la muela abrasiva durante el proceso de rectificado. Sin embargo, no detallan como se ha realizado el ensayo de compresión, ni determinan un modelo de fractura como tal.

Herman y Krzos [7], señalan la importancia de un agente estructural de aglomerante vitrificado en un proceso de desgaste de la muela abrasiva, demostrando que una fase cristalina generada en la estructura del aglomerante de cerámico vítreo en una muela abrasiva dura con granos submicrocristalinos CBN, influye en la tenacidad a la fractura y en el módulo de elasticidad, alterando  $R_a$  y aumentando la resistencia al desgaste. Además, resalta que la tenacidad a la fractura del aglomerante está relacionada con el módulo de elasticidad de la muela. Ellos indican una metodología experimental para obtener el desgaste radial y el *G-ratio* de la muela abrasiva con diferentes tipos de aglomerantes. Sin embargo, no mencionan si el esfuerzo que desprende los granos del aglomerante supera la tenacidad a la fractura o es la carga máxima.

Autores como Li *et al.* [8] abordan de manera muy general la muela abrasiva y esto implica su topografía, la estructura microscópica, el comportamiento a la fractura en un ensayo de compresión y la ejecución en el proceso de rectificado. La validación sobre el proceso es geométrica, es decir genera la superficie a partir de la geometría de los granos abrasivos. Los parámetros clásicos de rugosidad basados en la forma y tamaño de grano alcanzan resultados parecidos a la realidad en cuanto a precisión. Además, proporcionan ensayos de compresión que determinan el comportamiento a la fractura de la muela abrasiva. Sin embargo, no existe en el artículo nada relacionado a ensayos de desgaste, ni acerca de modelos de fractura. Por lo que queda pendiente conocer si el ensayo de compresión caracteriza realmente el comportamiento a la fractura de la muela abrasiva.

Existe actualmente limitaciones de conocimiento en cuanto a las características mecánicas de la muela abrasiva, es decir, no existen metodologías de ensayos, ni modelos de fractura, en donde se pueda caracterizar el comportamiento a la fractura de la muela abrasiva como composite y su relación con el desgaste

volumétrico. Por lo que para analizar su comportamiento es necesario primeramente, obtener relaciones entre la pérdida de geometría de la muela abrasiva, energía específica de corte y acabado superficial de la pieza con respecto a la pérdida de material eliminado de la pieza.

En este artículo, se presenta una metodología experimental, se estudia y se cuantifica la evolución del desgaste volumétrico de la muela abrasiva de alúmina vitrificada monocristalina durante el rectificado de acero de herramientas hasta que se fracture la muela abrasiva y poder analizar su comportamiento. En el apartado 3, se detallan los materiales y equipos que han sido utilizados. Además, se establece una batería de ensayos variando los parámetros de corte. En el apartado 4, se discute los resultados, en donde se estudia la evolución del desgaste, la energía específica y  $R_a$ . En el apartado 5, se presentan las conclusiones.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL, MATERIALES Y EQUIPOS

Esta sección define los primeros parámetros de prueba e introduce los primeros resultados experimentales relacionados con el desgaste de la muela abrasiva.

### 2.1. Materiales e instrumentación

Para este propósito, se ha elegido una muela abrasiva de dureza G y estructura 12, clasificada como blanda y abierta respectivamente, para que favorezca el desgaste volumétrico. La muela abrasiva que se ha utilizado es alúmina vitrificada cuya nomenclatura es 4MB A46G12V de dimensiones 400x40x127mm fabricada por la empresa abrasivos UNESA S.L. Es una muela de alúmina vítrea con estructura cristalina monocristal de tamaño de grano 350  $\mu\text{m}$  cuya estructura es abierta con una proporción del 40% monocristalino cúbico y del 60% corindón blanco cúbico. Las principales propiedades de la muela se recogen en la Tabla 1.

Antes de proceder a realizar las pruebas, la muela abrasiva es diamantada mediante un diamantador estático de loseta policristalino sintético (PCD), con los parámetros mencionados en la Tabla 1. Cabe mencionar, que la muela únicamente se diamanta al inicio de cada prueba de desgaste. Esto sirve para homogeneizar la superficie de la muela abrasiva.

La pieza de trabajo que se ha utilizado durante los ensayos es un bloque de perfil T de acero para herramientas templado AISI 02, cuya dureza es de 54HRC y dimensiones 45x30x125 mm.

Tabla 1. Condiciones y equipos para los ensayos.

Elemento	Características	Descripción
<b>Muela abrasiva</b>	Dimensiones 400x40x127mm	4MB A46G12V
	Fracción del volumen abrasivo, $V_g$ (%)	41
	Diámetro del grano promedio, $d_g$ (mm)	0,35
	Modulo de Young, $E_s$ (GPa)	32
	Ratio de poisson $\nu_s$	0,2
	Densidad ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	1772
<b>Diamantado</b>	Profundidad de diamantado en cada pasada $a_d$ ( $\mu\text{m}$ )	20
	Velocidad del avance axial del diamante $v_d$ (mm/min)	250
<b>Potencias</b>	Anchura de contacto real entre muela y diamante $b_d$ (mm) - Loseta	2,1
	Medidor de potencia	UPC-FR
<b>Topografía</b>	Microscopio	Dino-Lite Digital ProX Microscope (AM4013)
	Rugosímetro	Mitutoyo SJ210
<b>Pieza</b>	Material	AISI 02 (90MnCrV8)
	Dureza (HRC)	54

Los ensayos se han realizado en una rectificadora plana BLOHM ORBIT 36, con un área de rectificado de 300x600 mm. Los movimientos de rectificado y diamantado inicial se controlan mediante control numérico (CNC). Un accionamiento hidráulico mueve la mesa. Posee una potencia de hasta 8.5 KW y velocidades de la muela abrasiva de hasta 35 m/s.

$R_a$  se ha medido con un rugosímetro marca Mitutoyo SJ210. Para la adquisición y análisis de potencias, se instala en la rectificadora un vatímetro Load Controls Universal Power Cell, Model UPC-FR, con una tarjeta de adquisición de datos National Instruments usb-6008 y se utiliza un programa desarrollado en Python. Con la potencia se ha obtenido la energía específica de corte.

Para cuantificar el desgaste volumétrico de la muela abrasiva, se ha utilizado un cubo de grafito, que es un material muy blando y permitirá que la muela abrasiva deje su marca una vez realizado el rectificado. La marca que deje la muela abrasiva sobre el grafito se medirá con un reloj comparador marca Mitutoyo con base inmantada y con ello, se podrá ver la evolución del desgaste volumétrico a lo largo de los ensayos. Además, al finalizar un ensayo, se ha realizado capturas fotográficas con ayuda del microscopio Dino-Lite **Digital** ProX (AM4013) a 50 aumentos y 220 aumentos para verificar el estado del composite. En la Tabla 1 se detallan las condiciones y equipos para los ensayos preliminares y de caracterización.

## 2.2. Metodología de ensayo

Para obtener la caracterización del desgaste volumétrico de la muela de alúmina vítrea, se ha estudiado la evolución del desgaste de la muela abrasiva durante el rectificado de acero en función de distintos parámetros de corte. Se ha analizado la influencia de los diferentes parámetros del proceso. Para ello, el presente artículo contiene una primera fase o ensayos preliminares, en la cuál, se ha realizado una batería de ensayos y se han analizado sus resultados y una segunda fase o ensayos de caracterización en la cual, según los resultados de los ensayos preliminares, se ha realizado una prueba con muchos más ensayos, con el fin de analizar en detalle su comportamiento y de poder llegar a la fractura.

Para poder medir el desgaste volumétrico, tanto en los ensayos preliminares como de caracterización, se ha procedido a realizar el rectificado únicamente en el centro del ancho de la muela (Fig. 1).

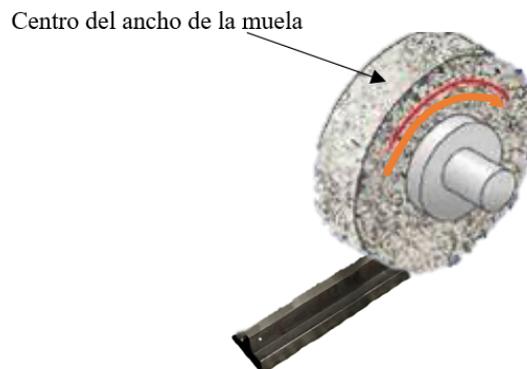


Fig. 1. Centro del ancho de la muela abrasiva.

Para los ensayos preliminares, en cada prueba se ha variado la velocidad de avance ( $v_w$ ) y el material eliminado específico de la pieza ( $V_w'$ ), manteniendo la velocidad de la muela abrasiva ( $v_s$ ) y la profundidad de corte ( $a_c$ ). En la Tabla 2 se detalla los parámetros de operación para los tres casos siguientes.

Cada prueba se divide en 5 ensayos y cada ensayo se divide en dos secciones. La primera sección es el proceso de rectificado, durante la cual, se ejecuta la operación de rectificado en la pieza y simultáneamente se recogen las señales de potencia y después, la muela abrasiva pasa sobre el grafito dejando su marca. La segunda sección corresponde a la medición. Primero, se realiza la medición de la profundidad de corte en 3 zonas diferentes de la zona rectificada, después,  $R_a$  se mide en 6 zonas diferentes de la zona rectificada, luego, la captura de imágenes de la topografía de la muela abrasiva desgastada se realiza en 4 zonas de la periferia cada 45°. Después, se realiza la medición del desgaste volumétrico en 5 zonas diferentes del grafito. Por último, se realiza una captura fotográfica del perfil de la marca en el grafito (Fig. 2). Cada

Tabla 2. Parámetros de operación de los ensayos preliminares.

Prueba	$a_e$ teórica ( $\mu\text{m}$ )	$a_e$ real ( $\mu\text{m}$ )	$V_w'$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}$ )	$v_s$ ( $\text{m/s}$ )	$v_w$ ( $\text{mm}/\text{min}$ )	$Q'$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ )	$h_{cu,max}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	20	15	125	30	20000	6,67	1,91
2	20	12	250	30	30000	10	2,88
3	20	11	500	30	40000	13,33	3,84

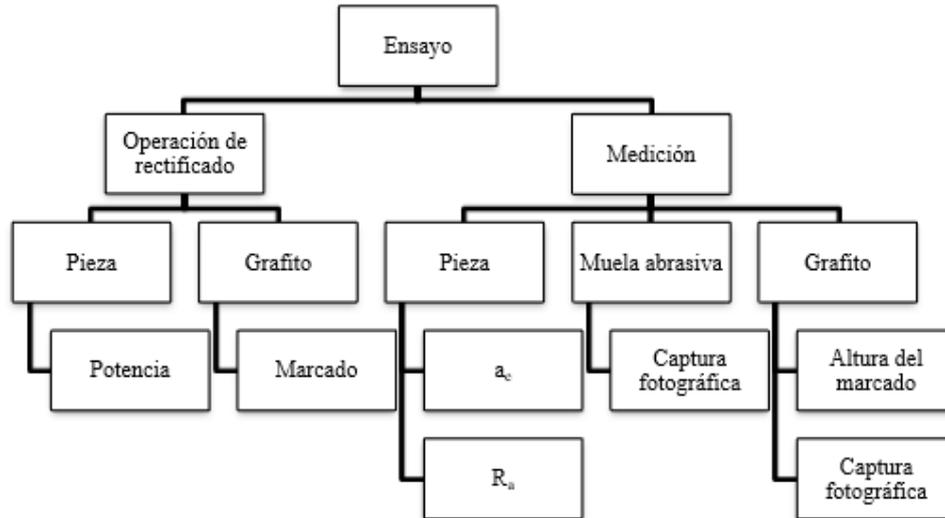


Fig. 2. Flujograma de la metodología de ensayo.

pasada real corresponde a una pasada de rectificado y a una de apagado de chispa, en donde los datos obtenidos se consideran únicamente de la primera pasada.

Para el ensayo de caracterización, se ha eliminado la mayor cantidad de volumen de pieza rectificadora específica y así mismo, cada ensayo se ha dividido en dos secciones similares a los ensayos preliminares. Con los datos obtenidos del desgaste volumétrico de la muela abrasiva y de la pieza rectificadora se puede caracterizar el desgaste de la muela abrasiva mediante la razón de rectificado también llamado G-ratio, la cual es el volumen de material eliminado por unidad de volumen del desgaste de la muela abrasiva [2]. El desgaste volumétrico, la energía específica de corte y  $R_a$  se miden y analizan.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Ensayos preliminares

Después de realizar los ensayos preliminares variando los parámetros de corte, se ha analizado la influencia de cada parámetro en el desgaste de la muela abrasiva. Por este motivo, se representa la evolución del desgaste de la muela abrasiva, la energía específica de corte y  $R_a$  con respecto al volumen específico de material eliminado. Posteriormente se realiza un análisis comparativo entre las tres pruebas.

Los parámetros de operación establecidos sirven para caracterizar el desgaste de la muela abrasiva y conocer cual de ellos fuerza a la muela a una situación para la que no fue diseñada, con el fin de que pueda desgastarse rápidamente y llegue a la fractura.

La Fig. 3, muestra el desgaste en una gráfica, en donde se mide el G-ratio, la cual se define en el eje de las abscisas el material eliminado específico de la pieza  $V_w'$  [ $\text{mm}^3/\text{mm}$ ] y el eje de las ordenadas el desgaste radial específico de la muela abrasiva  $V_s'$  [ $\text{mm}^3/\text{mm}$ ]. En esta figura, muestra una evolución lineal del desgaste con el número de pasadas. En todos los ensayos, el coeficiente de determinación  $R^2$  se man-

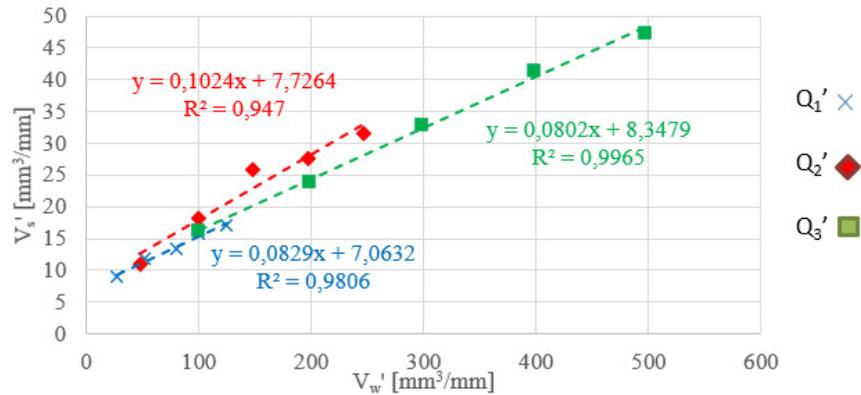


Fig. 3. Desgaste volumétrico de la muela abrasiva por ancho versus volumen de pieza eliminado por ancho de muela abrasiva en ensayos preliminares.

tiene por encima de 0,94. Se puede observar que, al inicio de los tres ensayos, existe un alto ratio de desgaste. Los resultados obtenidos presentan tendencias de desgaste muy parecidas, de tal manera que, para los ensayos realizados, los valores de  $G$  son 12,06, 9,77 y 12,47.

Los valores obtenidos del  $G$ -ratio son muy inferiores a los que muestra Malkin en su trabajo [2], en los que parten de  $5 \text{ mm}^3/\text{mm}$  y alcanzan valores máximos de  $35 \text{ mm}^3/\text{mm}$  para una cantidad de remoción de  $1500 \text{ mm}^3/\text{mm}$  de material de pieza. Esta diferencia se debe principalmente a la dureza de la muela abrasiva utilizada.

Estos resultados muestran lo siguiente:

- La influencia de la velocidad de avance en el desgaste volumétrico (al menos en los valores en que se han realizado los ensayos) es pequeña y no muestra una tendencia.
- De las tres pruebas realizadas, la más larga es la correspondiente a un  $Q'$  de  $13,33 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ , propio de procesos de desbaste. El desgaste radial final que ha sufrido la muela abrasiva es de  $0,039 \text{ mm}$ , un valor muy inferior al diámetro de grano abrasivo. Esto muestra que a pesar de que el desgaste volumétrico es apreciable a lo largo del ensayo, al parecer, no se ha producido una pérdida de grano abrasivo.
- Aún así, la cantidad de datos disponible es pequeña para poder hacer un análisis completo de las tendencias en el desgaste volumétrico de las muelas, es por ello que es necesario llevar a cabo una prueba con mayores valores de  $V_w'$ .
- Teniendo en cuenta que un valor de  $Q'$  mayor que  $13,33 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  sería poco realista desde un punto de vista industrial, se van a adoptar los parámetros de esta última prueba (por ser los más agresivos, y por tanto los que a priori deberían generar un mayor desgaste en la muela abrasiva) para proceder con la prueba completa de caracterización del desgaste de la muela abrasiva.

La Fig. 4 muestra la evolución de la  $e_c$  en  $\text{J}/\text{mm}^3$ , con respecto al material eliminado específico de la pieza. Se observa una tendencia muy similar en las pruebas  $Q_2'$  y  $Q_3'$ . En ambos casos, la energía específica mantiene un valor sensiblemente constante en  $20 \text{ J}/\text{mm}^3$ , independientemente del número de pasadas. La prueba  $Q_1'$ , por el contrario, se mueve entre  $30$  y  $40 \text{ J}/\text{mm}^3$  pero no presenta una evolución clara. A medida que aumenta el caudal de viruta específica ( $Q'$ ), la energía específica de corte disminuye. Una de las principales causas es la baja fuerza que ejerce cada grano, debido al bajo caudal de viruta en la primera prueba  $Q_1'$  con respecto a las otras pruebas. Ya en la segunda  $Q_2'$  y tercera prueba  $Q_3'$ , el caudal de viruta es mayor, aumentando la fuerza en cada grano. Evidentemente, la duración del mismo ha sido corta como para poder extraer otras conclusiones.

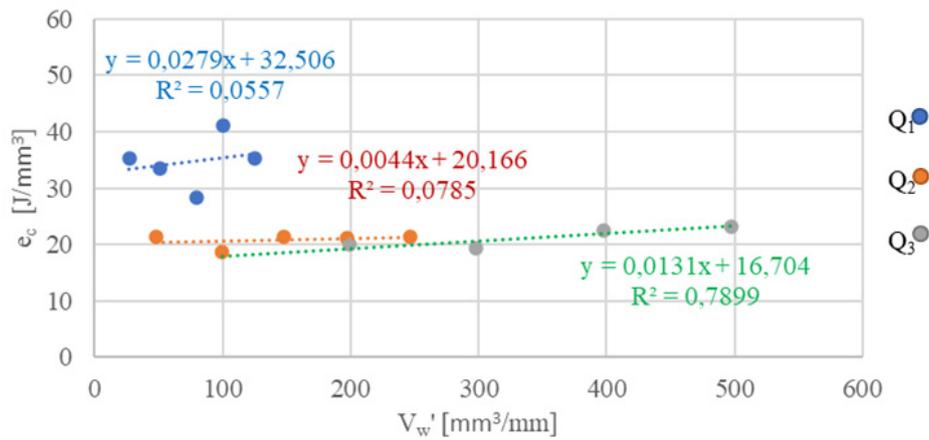


Fig. 4. Energía específica de corte versus volumen de pieza eliminado por ancho de muela abrasiva en ensayos preliminares.

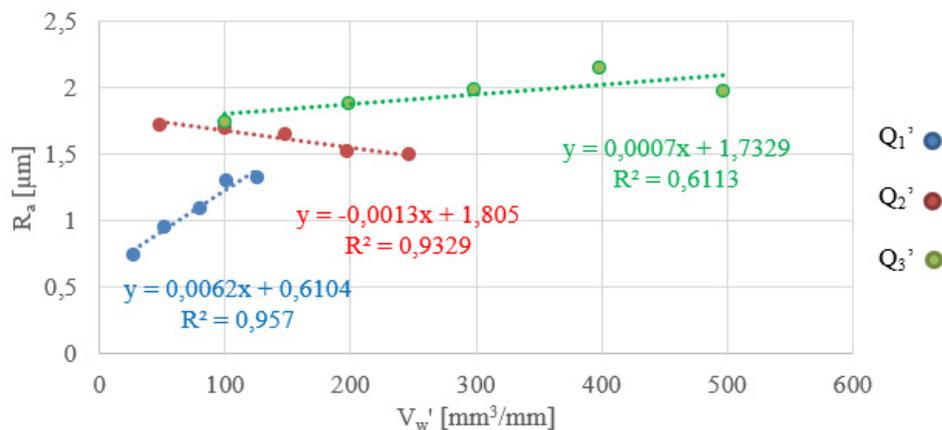


Fig. 5.  $R_a$  versus volumen de pieza eliminado por ancho de muela abrasiva en ensayos preliminares.

La Fig. 5 muestra una evolución de  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ), con respecto al material eliminado específico de la pieza. Se puede observar, que la prueba  $Q_3'$  muestra una  $R_a$  algo superior con respecto a las otras dos pruebas, esto es debido al aumento de la velocidad de avance ( $v_w$ ) y al número de pasadas, que hace que se incrementen las cargas para cada grano, aumentando el espesor de viruta y a su vez, dejando marcas amplias y profundas sobre la superficie rectificadas. Las pruebas  $Q_2'$  y  $Q_3'$ , dan resultados de  $R_a$  entre 1,5 y 2  $\mu\text{m}$ , y la prueba  $Q_1'$  ha generado resultados entre 0,5 y 1,5  $\mu\text{m}$ .

Según los resultados de los ensayos preliminares, el desgaste radial máximo que se obtuvo ha sido de 0,039 mm que pertenece a la prueba  $Q_3'$ . Como el diámetro de los granos es de aproximadamente 0,350 mm, el valor del desgaste radial máximo indica que los granos se han desgastado y no desprendido del aglomerante. Por lo que para caracterizar el desgaste de las muelas de alúmina vitrificadas se ha procedido a realizar más ensayos consecutivos.

### 3.2. Ensayos de caracterización

Para la realización del ensayo de caracterización, se han desarrollado 25 ensayos consecutivos con los parámetros de operación de la prueba  $Q_3'$ . Cabe mencionar, que se han realizado ensayos hasta un valor de  $V_w'$  de 2500  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ , momento en el cuál se han manifestado fenómenos vibratorios que no aconsejaban continuar con la prueba. En la Tabla 3 se detalla los parámetros de operación del ensayo de caracterización.

Tabla 3. Parámetros de operación de los ensayos de caracterización.

Prueba	$a_e$ teórica ( $\mu\text{m}$ )	$a_e$ real ( $\mu\text{m}$ )	$V_w'$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}$ )	$v_s$ (m/s)	$v_w$ (mm/min)	$Q'$ ( $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ )	$h_{cu,max}$ ( $\mu\text{m}$ )
4	20	12	2500	30	40000	13,33	3,84

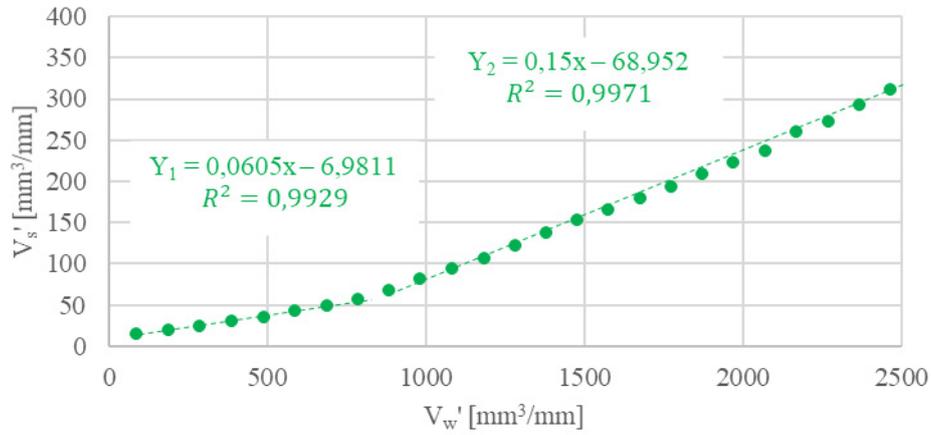


Fig. 6. Desgaste volumétrico de la muela abrasiva por ancho versus volumen de pieza eliminado de por ancho de muela abrasiva en ensayos de caracterización.

En la curva se pueden apreciar dos zonas de desgaste lineal diferenciadas. La primera zona, que comienza con  $V_w'$  de  $90\text{mm}^3/\text{mm}$  y abarca hasta un  $V_w'$  de  $780\text{mm}^3/\text{mm}$ , presenta un *G-ratio* de 16,53. La segunda zona, que abarca hasta el final de la prueba llega hasta un  $V_w'=2500\text{mm}^3/\text{mm}$  con un desgaste radial final de 0,261 mm, corresponde con un *G-ratio* de 6,67. EL cambio de tendencia es debido a que los granos, por el incremento de carga, muy probablemente comienzan a desgastarse y junto con el embotamiento de la muela abrasiva, disminuye su capacidad de corte.

La Fig. 7 muestra la evolución de la energía específica  $e_c$ , en  $\text{J}/\text{mm}^3$ , con respecto al material eliminado específico de pieza ( $V_w'$ ). Se observa que la energía específica mantiene un valor sensiblemente constante en  $20\text{J}/\text{mm}^3$  hasta  $780\text{mm}^3/\text{mm}$  de material eliminado específico, que es donde cambia la tendencia de desgaste observada en el gráfico anterior. Después, sube a  $25\text{J}/\text{mm}^3$  y se mantiene constante hasta finali-

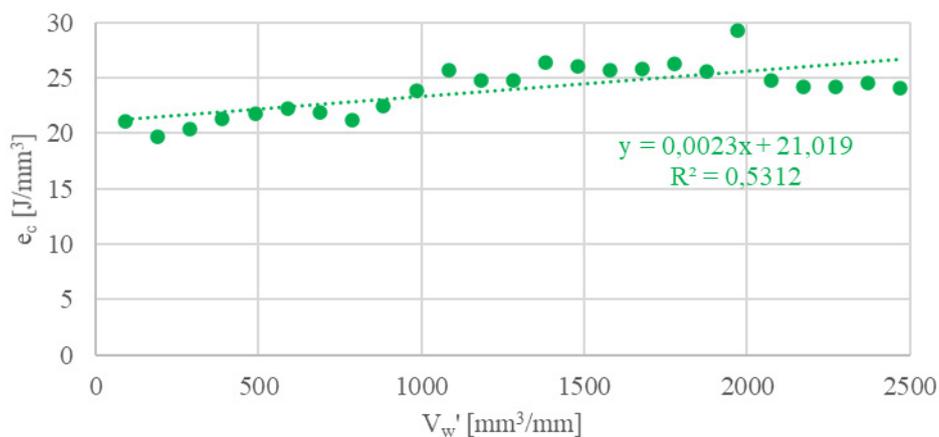


Fig. 7. Energía específica de corte versus volumen de pieza eliminado por ancho de muela en ensayos de caracterización.

zar el ensayo. Este incremento en un 25%, es debido a que los granos muy probablemente comienzan a perder sus filos y, además, la muela abrasiva comienza a embotarse, a medida que aumenta la cantidad de material eliminado  $V_w'$ . Esto reduce la capacidad de corte de la muela abrasiva, aumentando el área de contacto, por lo que se incrementa la fricción entre la superficie de la pieza y la muela abrasiva, provocando un aumento de su energía. Cabe mencionar que la potencia ha dado un promedio de 2 KW.

La Fig. 8 muestra una evolución de  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ), con respecto al material eliminado específico de la pieza.  $R_a$  se mantiene en torno a 1,8–1,9  $\mu\text{m}$  hasta 984  $\text{mm}^3/\text{mm}$  de material eliminado específico de la pieza. Luego,  $R_a$  aumenta hasta 0,3  $\mu\text{m}$  que es cuando finaliza el ensayo, es decir, aumenta paulatinamente  $R_a$  hasta en un 22%, siendo un incremento no tan pronunciado. Este aumento muy probablemente puede ser un indicador de la presencia de viruta en las porosidades de la muela abrasiva y en menor grado a causa de granos desgastados, como consecuencia de esto, aumenta el rozamiento y rayado, provocando ranuras cada vez más amplias y profundas en la superficie de la pieza a medida que aumenta la proporción de embotamiento en la muela abrasiva, afectando el acabado superficial.

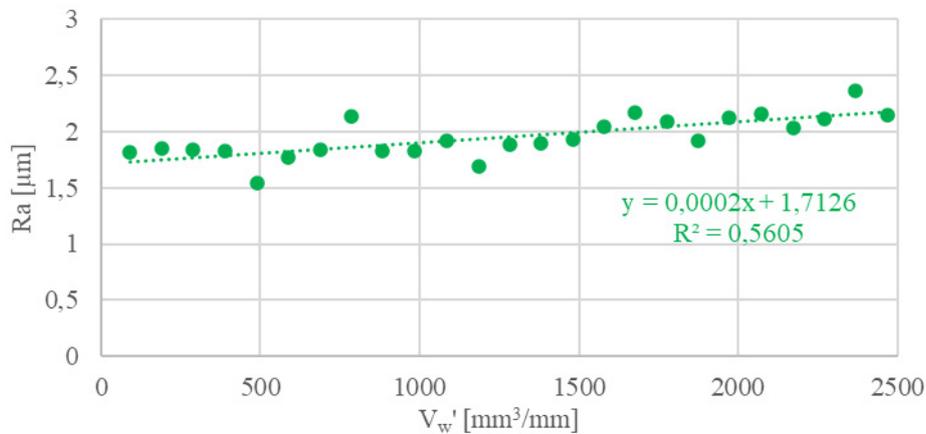


Fig. 8.  $R_a$  versus volumen de pieza eliminado por ancho de muela abrasiva en ensayos de caracterización.

#### 4. CONCLUSIÓN

El desgaste de la muela abrasiva fue evaluado en este estudio mediante ensayos experimentales, en donde se han obtenido resultados correspondientes a los parámetros del proceso. A continuación se detallan los resultados más relevantes de los ensayos realizados:

1. Los resultados presentados muestran que no es posible estudiar el comportamiento de fractura de la muela abrasiva si el fenómeno de pérdida de granos abrasivos no está aislado.
2. El desgaste volumétrico de la muela abrasiva es un fenómeno complejo, en donde se han podido observar cosas que no se explican directamente con lo que se ha visto en la teoría y que el trabajo realizado marca la necesidad de hacer más ensayos de caracterización y trabajar en temas de modelización matemática del fenómeno.
3. En la rectificación de aceros de alta dureza, con una muela abrasiva blanda y estructura abierta, la energía específica de corte disminuye y  $R_a$  aumenta, a medida que se incrementa la velocidad de avance. En cambio, en el desgaste volumétrico, la influencia de la velocidad de avance es pequeña, ya que no muestra una clara tendencia en los ensayos preliminares realizados.
4. En las gráficas de caracterización, se puede observar dos tendencias de desgaste de la muela abrasiva. Cuando  $V_w'$  es 780  $\text{mm}^3/\text{mm}$ , existe un cambio en el desgaste volumétrico y en la energía específica de corte, es decir, que cuando cambia la pendiente de la curva de desgaste, cambia el comportamiento de la muela abrasiva, provocando un consumo mayor de energía específica de corte, aumentando en un 25% hasta finalizar el ensayo. Esto es debido a que muy

probablemente aumenta la proporción de granos desgastados y el embotamiento de la muela abrasiva, disminuyendo la capacidad de corte de la muela abrasiva.

5. Aumentar el volumen de pieza eliminado, tiene efectos muy negativos en el acabado superficial. En los ensayos de caracterización, cuando  $V_w'$  es  $984 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ,  $R_a$  ha comenzado a aumentar paulatinamente, llegando hasta un 22% al finalizar el ensayo. Esto, muy probablemente es debido en mayor grado al embotamiento de la muela abrasiva, aumentando el rozamiento y rayado en la superficie de la pieza.

Este trabajo presentado servirá para caracterizar futuros modelos numéricos.

En líneas futuras, se realizará otro ensayo de caracterización en donde se utilizará una muela abrasiva de menor diámetro, menor grado de dureza y estructura más abierta. Además, se cambiará la zona de rectificado y el material de pieza, con el fin de que se observe un patrón de desgaste más claro en la muela abrasiva, que probablemente esté relacionado con la fractura.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido del Ministerio de Economía y Competitividad español y el programa operativo FEDER para financiar el proyecto “Modelos científicos y sensorización avanzada de máquinas-herramienta para el mecanizado eficiente de componentes de precisión de turbinas de baja presión” (DPI2017-82239-P).

## REFERENCIAS

- [1] Marinescu, I., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W., Inasaki, I., *Handbook of machining with grinding wheels*, 66. Palm Beach, Florida: Taylor & Francis Group, LLC (2006)
- [2] Malkin, S., Guo, C., *Grinding Technology: Theory and application of machining*, Second Edi. New York: Industrial Press Inc., (2008)
- [3] Jackson, M.J., Mills, B., “Materials selection applied to vitrified alumina & CBN grinding wheels”, *J. Mater. Process. Technol.*, **108**(1), 114–124 (2000)
- [4] Kopac, J., Krajnik, P., “High-performance grinding-A review”, *J. Mater. Process. Technol.*, **175**(1–3), 278–284 (2006)
- [5] Miyahara, A., Fujii-E, Y., “1. Introduction - Principles of modern grinding technology”, *Nucl. Eng. Des. Fusion*, **4**(3), 1–14 (1987)
- [6] Herman, D., Markul, J., “Influence of microstructures of binder and abrasive grain on selected operational properties of ceramic grinding wheels made of alumina”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **44**(5), 511–522 (2004)
- [7] Herman, D., Krzos, J., “Influence of vitrified bond structure on radial wear of cBN grinding wheels”, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**(14), 5377–5386 (2009)
- [8] Li, H., Yu, T., Zhu, L., Wang, W., “Modeling and simulation of grinding wheel by discrete element method and experimental validation”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **81**(9–12), 1921–1938 (2015)

## ANEXOS

Parámetro	Nombre	Unidades
$a_e$	Profundidad de pasada	mm
$e_c$	Energía específica de corte	J/mm <sup>3</sup>
G	Razón de rectificado	
$h_{cu,max}$	Espesor máximo de viruta	μm
$Q'$	Caudal de viruta específica	mm <sup>3</sup> /mm·s
$v_s$	Velocidad periférica de la muela abrasiva	m/s
$v_w$	Velocidad de avance	mm/min
$V_s'$	Volumen de muela desgastado por mm de anchura	mm <sup>3</sup> /mm

$V_w'$	Volumen de pieza rectificada por mm de anchura	$\text{mm}^3/\text{mm}$
$R_a$	Rugosidad media	$\mu\text{m}$

## EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF RADIAL WEAR OF VITRIFIED BOND GRINDING WHEEL

**Abstract** – Grinding is one of the most value-added operations in the manufacture of mechanical components. It is a finishing operation that achieves dimensional tolerances and surface finishes that cannot be achieved by other manufacturing processes. This operation allows an excellent fatigue life of the component to be obtained, which is why its presence is very important in high-tech components for aeronautics, automotive, optics, etc. The tool, the grinding wheel, is a composite that suffers wear during its interaction with the part. The wear causes loss of tolerances and surface finish, thus affecting the viability of the operation. It can even lead to damage that adversely affects the fatigue behavior of the component. Since the manufacturing of grinding wheels is very handmade, and the manufacturer does not have data on the mechanical characteristics of the abrasive and the bond, the study of wear phenomena is traditionally based on trial-and-error schemes. This work is the first step for the subsequent development of numerical models and new experimental tests to characterize the fracture behavior of the grinding wheel as a composite. Previously, it is necessary to obtain relationships between the loss of geometry of the grinding wheel and the forces, specific cutting energy and final surface finish of the part. In this work, an experimental methodology for wear quantification is presented. After describing the tests, they are carried out on a sensorized industrial grinding machine using an alumina grinding wheel. The evolution of forces, specific cutting energy and surface finish with wear under different grinding conditions is then discussed. The results reveal that it is not possible to study the fracture behavior of the grinding wheel if the phenomenon of abrasive grain loss is not isolated. The wear of the grinding wheel has increased as the volume of the ground piece has increased; however, with the tests carried out, the abrasive grains have not become detached from the bond, so actions are established to be able to isolate this phenomenon in future tests. In the preliminary tests, as the feed rate increases, the specific cutting energy decreases and  $R_a$  increases, while there is no clear trend in volumetric wear. In the characterization tests, two abrasive wear trends can be observed. The change in the trend causes an increase in specific energy and  $R_a$ . These results, presented in this article, will allow further validation of the numerical models on which work has already begun.

**Keywords** – Grinding, Abrasive Grains, Wear, Alumina, Vitrified Bond, Grinding Wheel.