



Optimización de procesos de superacabado para recubrimientos de alta dureza

I. Pombo¹, L. Godino², J. A. Sánchez², J. Retuerto², U. Alonso²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), inigo.pombo@ehu.eus

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), leire.godino@ehu.eus, joseantonio.sanchez@ehu.eus, jon.retuerto@ehu.eus, unai.alonso@ehu.eus

En el sector de la automoción, es habitual la aplicación de recubrimientos de cromo hexavalente sobre piezas para mejorar su dureza superficial o protegerlas frente al rozamiento que puedan sufrir durante su vida útil. Sin embargo, el uso de este tipo de recubrimiento presenta graves problemas desde el punto de vista medioambiental. Debido a esto, están siendo sustituidos por recubrimientos como el cromo trivalente, mucho más respetuoso con el medio ambiente y con unas propiedades mecánicas similares.

El principal problema que se presenta cuando se sustituyen este tipo de recubrimientos es su baja maquinabilidad. Es por ello que es necesario el desarrollo e implementación de procesos de fabricación que consigan cumplir con los requerimientos de acabado superficial exigidos en este tipo de aplicaciones. En estos casos, y debido a la extrema dureza de este tipo de materiales se plantea un proceso en dos fases: desbaste/semidesbaste y acabado/superacabado.

La fase de desbaste/semidesbaste consiste en un proceso de rectificado y la fase de acabado/superacabado se suele llevar a cabo mediante procesos de mecanizado abrasivo con cinta. Desde un punto de vista del diseño del proceso, el objetivo es conseguir realizar tanto el proceso de desbaste/semidesbaste como el de acabado/superacabado mediante rectificado en una misma máquina de una sola atada de pieza.

Para ello, es necesario conseguir desarrollar un proceso de desbaste/semidesbaste que consiga una rugosidad superficial de la pieza con valores de R_a menores de $0,2\mu\text{m}$ y una minimización de los picos frente a los valles, es decir, se debe cumplir la condición de que $R_{vk} > R_{pk}$.

En este trabajo se presenta una aproximación a la fase de desbaste+semidesbaste utilizando muelas de SiC y aglomerante vítreo para el rectificado de piezas de acero recubierta de cromo trivalente mediante el procedimiento de HVOF. El trabajo incluye pruebas experimentales en condiciones próximas a la práctica industrial en las que se analizan la influencia tanto de las condiciones de diamantado como de los parámetros del proceso tanto en los parámetros de rugosidad como en el aspecto visual de la pieza. Los resultados obtenidos muestran que a pesar de que las muelas propuestas tienen una capacidad de arranque de material adecuada, sufren de un desgaste excesivo, especialmente en las fases de desbaste iniciales. Así mismo, en la fase de semidesbaste se consiguen los valores de R_a requeridos (inferiores a $0,2\mu\text{m}$), y la superficie presenta altos valores de R_{vk} frente a R_{pk} . Se trata en cualquier caso de unos resultados prometedores que proporcionan una base sólida para futuras investigaciones en la optimización del proceso de rectificado y superacabado de materiales ultraduros.

1. Introducción

El rectificado es un proceso de mecanizado abrasivo de alto valor añadido que normalmente se sitúa en las últimas fases del proceso de fabricación de una pieza. Se trata de un proceso que se caracteriza por su capacidad de conseguir unos acabados superficiales óptimos, así como unas estrechas tolerancias dimensionales y geométricas. Así mismo, también destaca por su capacidad de mecanizar materiales de alta dureza. En este sentido, se trata de un proceso típico que se utiliza en el mecanizado de piezas con recubrimientos de alta dureza. Estos recubrimientos son uno de los procesos que más se utilizan habitualmente en la industria para mejorar las características superficiales de las piezas. Esta mejora puede ser de índole física, química, térmica o mecánica.

El recubrimiento de cromo hexavalente (CR6+) aplicado mediante pulverización térmica (HVOF) [1] es una de las opciones que más se han utilizado en el recubrimiento de piezas críticas en diferentes sectores como puede ser automoción o fabricación de maquinaria, especialmente en aplicaciones que requieren de resistencia al desgaste y a la corrosión. Sin embargo, se trata de un material que tiene un alto grado de toxicidad y puede generar problemas en las personas como pueden ser cáncer, daños hepáticos o problemas reproductivos. Esto ha provocado que ya desde 2003 empezaran a plantearse limitaciones en su uso [2], llegando a prohibirse su uso en automoción desde 2024 [5].

En este contexto, se han planteado alternativas que cumpliendo con las exigencias mecánicas no sean nocivas ni tóxicas para la salud del ser humano. Una de estas alternativas es el recubrimiento de cromo trivalente (Cr3+). Estudios tribológicos recientes [3] han constatado que el comportamiento del Cr3+ es equiparable al del Cr6+ desde el punto de vista mecánico. En consecuencia, es necesario desarrollar y poner a punto procesos de fabricación que sean capaces de lograr acabados de muy alta calidad (incluso acabado espejo en muchos casos) en un material de muy alta dureza como es el Cr3+ (dureza de 900HV, es decir, superior a 65HRC). Estos requerimientos se sitúan en valores de $Ra < 0,2\mu m$ y valores de $Rz < 1\mu m$. Adicionalmente (especialmente en aplicaciones que requieren acabado espejo), se pueden pedir parámetros más específicos como valores de $Rpk < 0,15\mu m$ o valores de RMR de entre 70% y 90%.

En este tipo de aplicaciones, lo más habitual es un proceso de rectificado (debaste+acabado) seguido de un proceso adicional de acabado mediante banda abrasiva. Este procedimiento implica tiempos muy largos de producción, la necesidad de maquinaria adicional o máquinas multitarea complejas. A medida que la industria del automóvil (y otros sectores) exigen tiempos de producción y costes más reducidos, el desarrollo de una tecnología competitiva para el superacabado de este tipo de piezas es algo prioritario [4]. Hashimoto et al. [5] realizan un análisis pormenorizado del estado del arte actual en lo referido a los procesos de superacabado y reflejan la necesidad de desarrollar técnicas abrasivas innovadoras para obtener procesos que, cumpliendo los requerimientos planteados previamente, sean competitivos desde el punto de vista industrial.

Es por ello, que el desarrollo de una tecnología de superacabado utilizando únicamente el proceso de rectificado se plantea como una posibilidad muy interesante. Las principales propuestas que se encuentran en la bibliografía para la fase de superacabado giran en torno a la utilización de muelas elásticas. Las muelas elásticas proporcionan una solución económica, industrial y flexible al problema de conseguir un grado de superacabado de la rugosidad superficial en la misma máquina donde se realiza el rectificado convencional. Al mismo tiempo, debido a las elevadas fuerzas normales que aparecen, se pueden inducir tensiones residuales de compresión en la superficie de la pieza [6].

Se trata de muelas abrasivas con un aglomerante de alta flexibilidad como caucho, poliuretano o resina [7] que les permite adaptarse al contorno de la superficie de trabajo [8] para conseguir resultados similares a los que se consiguen con operación de pulido. Una ventaja clave de estas muelas es su compatibilidad con las rectificadoras convencionales, lo que permite realizar tanto el rectificado como el superacabado en el mismo equipo. Existen multitud de estudios con respecto al uso de este tipo de muelas analizando la influencia de su deformación en el proceso [8] o la influencia de las fuerzas de rectificado en el acabado final y las tensiones residuales en la pieza [6].

Si bien esta tecnología es interesante y presenta unas grandes potencialidades, a día de hoy sigue teniendo ciertos inconvenientes que hacen que su aplicación industrial no sea inmediata. Uno de los más importantes es que la rugosidad de partida para poder llevar el proceso de superacabado debe situarse en $Ra < 0,4\mu m$. En la bibliografía se encuentran pocos trabajos en el rectificado de este tipo de recubrimientos de ultra alta dureza. Así, muchas de las referencias están basadas, directamente, en el rectificado de materiales de alta dureza. Así, Luo et al. [9] analizan el rectificado de metal duro utilizando muelas de diamante con aglomerante resina. Los resultados obtenidos son buenos, con unos valores de Ra de en torno a $0,12\mu m$, lo que, desde el punto de vista del acabado superficial, sería muy interesante. No obstante, habría que analizar si estos resultados son extrapolables o trasladables a recubrimientos. En esta misma línea, Abdullah et al. [10] analizan el comportamiento de este tipo de muelas (de diamante con aglomerante resina) en el rectificado creep feed de piezas de metal duro. De nuevo, y al igual que en el caso anterior se recogen resultados interesantes y que, de ser extrapolables al rectificado de piezas cilíndricas recubiertas, podrían ser aplicables.

Uno de los principales problemas en ese sentido, es la posible aparición de grietas en el recubrimiento debido a su bajo espesor. Kar et al. [11] desarrollaron un modelo de fuerzas para el rectificado de recubrimientos cerámicos de cara a predecir la aparición de dichas grietas y poder hacer una selección óptima de los parámetros de rectificado de cara a evitarlo. Utilizaron muelas de diamante electrodepositadas y la geometría de la pieza era plana. Se echa de menos un análisis de la rugosidad obtenida, así como una validación del modelo en condiciones industriales. En esta misma línea, Xiao et al. [12] desarrollan un modelo matemático complejo de cara a posibilitar la selección de parámetros de rectificado óptimos en piezas recubiertas atendiendo a aspectos tales como la integridad superficial de la pieza y la rugosidad final obtenida. El modelo presenta unos resultados prometedores (con errores inferiores al 10%) pero de nuevo el trabajo experimental está realizado sobre pieza plana y en condiciones de laboratorio. Por último, también cabe destacar el trabajo de Zhao et al. [13] que analiza el rectificado de piezas recubiertas desde el punto de vista de la propagación de las posibles grietas. Para ello desarrolla un modelo numérico de propagación de grietas en el recubrimiento, pero no ahonda en la influencia de los parámetros de corte o del tipo de muela en la calidad final de la pieza rectificada.

El análisis del estado del arte pone de manifiesto que, de cara a desarrollar un proceso de rectificado de súper acabado, la rugosidad de la pieza de partida es un aspecto crítico. La aparición de un nuevo material de recubrimiento de muy alta dureza implica la necesidad de poner a punto un proceso que sea capaz de cumplir los requerimientos de la pieza. La bibliografía consultada muestra que la aparición de grietas puede ser un aspecto crítico, pero se ha echado en falta un análisis de la influencia de los parámetros del proceso en un aspecto tan importante como es la rugosidad en el caso de una pieza cilíndrica.

En este trabajo se presenta una aproximación a la fase de desbaste + semidesbaste utilizando muelas de SiC y aglomerante vítreo para el rectificado de piezas de acero recubierta de cromo trivalente mediante el procedimiento de HVOF. En el apartado 2 se va a mostrar la metodología experimental seguida incluyendo tanto los elementos de monitorización y el protocolo de ensayos como la batería de ensayos realizada. En el apartado 3 se recogerán todos los resultados obtenidos y se llevará a cabo una discusión crítica de los mismo que derivará en un apartado 4 en el que se expondrán las principales conclusiones obtenidas.

2. Metodología experimental

El caso propuesto es un caso de rectificado cilíndrico de exteriores en vaivén. En la Figura 1 se puede ver un esquema del proceso, así como la nomenclatura de los parámetros principales. El objetivo propuesto es conseguir que, partiendo de la pieza en bruto tal y como viene del proveedor, se consiga obtener una rugosidad $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ con un valor de R_{vk} superior al valor de R_{pk} . Para ello, se propone una metodología experimental que se divide en dos etapas. Una primera etapa de desbaste y acondicionamiento de la pieza (eliminación del salto radial y de posibles errores de forma en el recubrimiento) y una segunda operación de semiacabado.

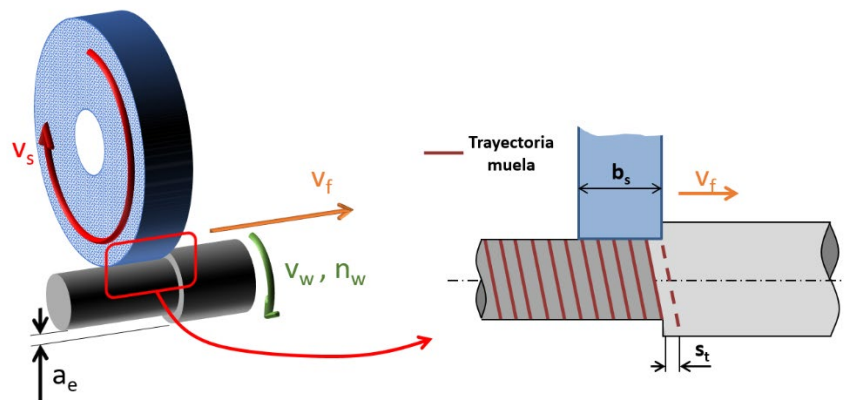


Figura 1: Esquema del proceso de rectificado cilíndrico de exteriores en vaivén

La muela utilizada es una muela de SiC con aglomerante vítreo con un tamaño de grano 100 con un diámetro de 410 mm y una anchura de 25 mm. El diamantado de la muela se llevará a cabo con un diamantador monopunta con una anchura de contacto muela-diamante estimada de 0,5 mm. La pieza es una pieza cilíndrica de acero F125 con un diámetro de 55 mm y una longitud de 250 mm. El recubrimiento tiene un espesor de 0,45-0,55 mm y es de Cr³⁺ realizado mediante HVOF con una concentración de 75% Cr₃C₂ - 25% NiCr. La dureza del mismo es superior a 900 HV.

Las pruebas se han llevado a cabo en una rectificadora cilíndrica DANOBAT FG600S con una potencia máxima de cabezal de 15 kW. Para la medición de la rugosidad de la pieza se ha utilizado un rugosímetro Mitutoyo SJ 210 para medir la rugosidad obtenida en pieza.

Para la primera fase de desbaste se ha propuesto fijar unos parámetros tanto de diamantado como de rectificado conservadores para evitar por un lado un desgaste excesivo de la muela abrasiva, y por otro la posible aparición de grietas en el recubrimiento debido a una fuerza normal excesiva. La bibliografía analizada en el apartado 1 muestra que éste es un aspecto crítico en el rectificado de este tipo de piezas. A partir de estas consideraciones en la Tabla 1 se recogen los parámetros tanto de diamantado como de rectificado. En dicha tabla se aprecia cómo el ratio de solapamiento U_d durante el diamantado es de 6,9 que corresponde a una operación de diamantado fino. Esto va a posibilitar que la rugosidad esperada en todo momento, se encuentre cerca del mejor resultado que se podría obtener con esta muela. En cuanto a los parámetros de rectificado, se puede observar que se ha propuesto un proceso con un valor de q_s de 126 que se corresponde con una operación de acabado y un ratio de solapamiento de 4 mm, lo que supone el 15% de la anchura de la muela. De nuevo un valor bajo que pretende evitar fuerzas excesivas que puedan generar grietas en el recubrimiento. El resultado es un proceso con una agresividad de 80, lo que va a suponer una carga por grano relativamente baja.

Tabla 1: Parámetros de operación para la fase de desbaste

Diamantado		Rectificado	
v_s [m/s]	30	v_s [m/s]	30
v_{fd} [mm/min]	100	v_r [m/min]	300
a_e [mm]	0,025	a_e [mm]	0,005
U_d [-]	6,9	n_w [rpm]	80
Nº de pasadas	4	q_s [-]	126
		st [% de b_s]	15
		Q_w' [mm ³ /mm·s]	1,19
		Agg [-]	80
		Nº de pasadas	10

El análisis del semiacabado se realiza en dos etapas. En una primera se analiza la influencia del diamantado en el acabado final y en una segunda, se afinan los parámetros de rectificado. Para el análisis de la influencia del diamantado se han propuesto dos posibles estrategias. Una primera con un diamantado fino y una segunda con una fase de diamantado basto seguido de un diamantado fino. Los parámetros de rectificado para esta etapa se recogen, junto con los parámetros de diamantado en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros para el análisis de la influencia del diamantado

Diamantado						Rectificado	
Estrategia 1		Estrategia 2					
Diamantado muy fino		Diamantado basto		Diamantado fino			
v_s [m/s]	30	v_s [m/s]	30	v_s [m/s]	30	v_s [m/s]	30
v_{fd} [mm/min]	60	v_{fd} [mm/min]	100	v_{fd} [mm/min]	80	v_r [m/min]	300
a_e [mm]	0,01	a_e [mm]	0,025	a_e [mm]	0,01	a_e [mm]	0,003
Ud [-]	11,6	Ud [-]	6,9	Ud [-]	8,8	n_w [rpm]	80
Nº pasadas	4	Nº pasadas	4	Nº pasadas	4	q_s [-]	126
						st [% de bs]	15
						Q_w' [mm³/mm·s]	0,72
						Agg [-]	62

Una vez definidos los parámetros de diamantado más adecuados, se procederá a realizar la selección de parámetros de rectificado que permitan obtener los acabados superficiales requeridos. En este caso se plantea una batería de 4 ensayos variándose la velocidad de avance (v_f) y la velocidad de giro de la pieza (n_w). El resultado es un conjunto de pruebas en el que se podrá analizar la influencia combinada de la agresividad del proceso, la superposición y el ratio de velocidades.

Tabla 3: Batería de ensayos de rectificado

Ensayo	1	2	3	4
v_s [m/s]	30	30	30	30
v_r [m/min]	300	300	200	200
a_e [mm]	0,003	0,003	0,003	0,003
n_w [rpm]	80	70	80	70
q_s [-]	126	144	126	144
st [% de b_s]	15	17,2	10	11,4
Q_w' [mm ³ /mm·s]	0,72	0,63	0,72	0,63
Agg [-]	62	54	62	54
Nº pasadas				

Para cada prueba se realizarán medidas de rugosidad y se obtendrá R_a , R_z , R_{pk} , R_{vk} y R_k . En cada ensayo se llevarán a cabo 3 medidas de rugosidad en tres zonas diferentes de la pieza (9 medidas por ensayo) y se mostrarán los valores medios obtenidos para asegurar la fiabilidad de los resultados.

3. Discusión de resultados

En la primera etapa de desbaste, se han realizado un total de 6 ciclos completos de rectificado hasta eliminar por completo el salto radial y las imperfecciones de la pieza recubierta. El comportamiento de la muela ha sido óptimo y los valores de rugosidad de partida obtenidos han sido de $Ra = 0,273 \mu\text{m}$ y la pieza no muestra evidencias de aparición de grietas superficiales (Figura 2). Los valores obtenidos muestran que, en principio, la muela, en condiciones de acabado debería ser capaz de llegar a conseguir los acabados requeridos. A pesar de que los valores de rugosidad obtenidos son adecuados, hubo que modificar los ciclos de diamantado después de cada ciclo de rectificado realizándose un total de 12 pasadas de diamantado por ciclo. Esto supone multiplicar por 3 las pasadas inicialmente propuestas aumentando los tiempos muertos del proceso, y pone de manifiesto un desgaste de muela muy elevado.



Figura 2: Aspecto de la pieza después del proceso de desbaste

En cuanto al proceso de semiacabado, se presentan en primer lugar los resultados correspondientes al análisis de la influencia del proceso de diamantado. En la Figura 3 se muestran los resultados completos en cuanto a rugosidad en pieza para las condiciones mostradas en la Figura 3.

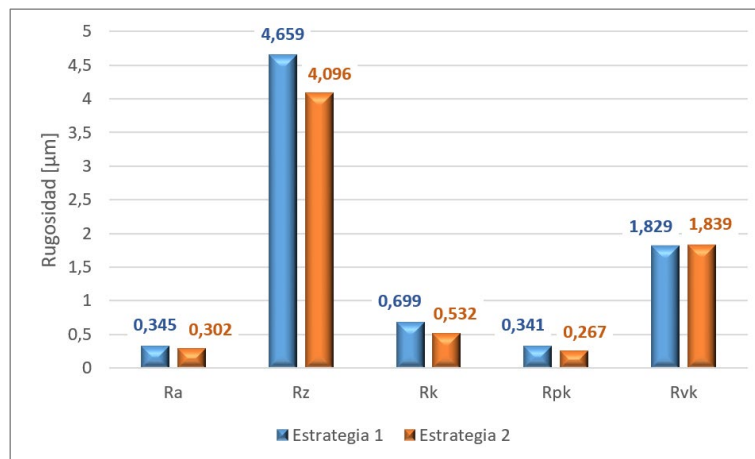


Figura 3: Resultados del análisis de la influencia del diamantado

Como se puede observar la rugosidad obtenida es ligeramente mayor que la obtenida en el proceso de desbaste. De esta manera, el valor de Ra para la estrategia de diamantado 1 es de $0,345 \mu\text{m}$ mientras que para la estrategia 2 es de $0,302 \mu\text{m}$. Si se analizan los valores de la curva de abbot-firestone, se puede observar cómo el valor de Rpk es sensiblemente inferior al valor de Rvk , algo, que como se indicó en un principio, es fundamental en el rectificado de este tipo de piezas. Estos resultados indican que, si bien un diamantado más fino tiende a mejorar la rugosidad del rectificado, un valor demasiado elevado de Ud cierra demasiado la muela mermando en exceso su capacidad de corte, y provocando que la rugosidad obtenida en la pieza aumente.

Una vez establecido el ciclo de diamantado óptimo, se muestran a continuación, en la Figura 4, los resultados correspondientes a la batería de ensayos propuestos en la Tabla 3.

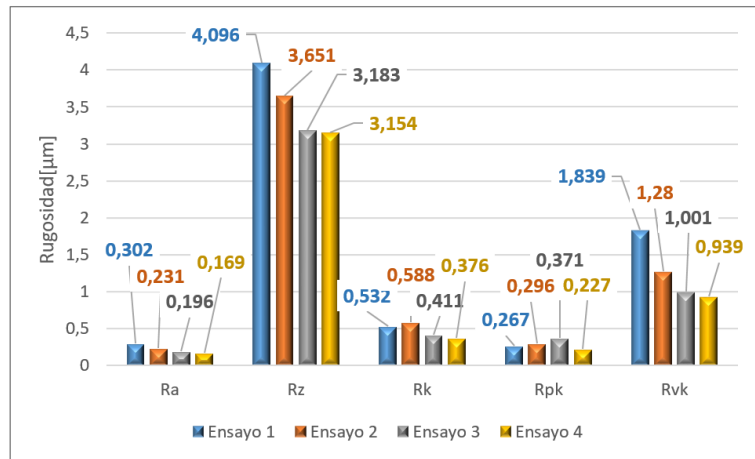


Figura 4: Resultados de rugosidad en las pruebas de análisis de la influencia de los parámetros de rectificado

Como se puede apreciar, los ensayos 1 y 2 (con una velocidad de avance, v_f , de 300 mm/min) presentan los peores resultados en cuanto a rugosidad, quedándose ambos fuera del mínimo exigido en cuanto a Ra. En ambos casos el ratio de superposición (st) es significativamente más alto que en los ensayos 3 y 4. Esto pone de manifiesto la importancia de v_f en el acabado superficial obtenido. En los ensayos 3 y 4, en los que la v_f es de 200 mm/min y que mantienen un ratio de superposición similar (10-11%), los resultados en cuanto a Ra y Rz son similares aunque algo mejores para el ensayo 4. Algo similar sucede con los resultados de Rk y Rvk. Sin embargo, si se analiza el valor de Rpk, se puede apreciar una diferencia sustancial entre ambos ensayos, siendo el Rpk del ensayo 4 (0,227 μ m) un 38% menor que el del ensayo 3 (0,371 μ m). Esta diferencia de resultados hay que buscarla en el ratio de velocidades del proceso. Un mayor ratio de velocidades implica un menor valor de v_w que, a partir de las consideraciones de la teoría clásica de rectificado, debería mejorar la rugosidad. En este caso el efecto es especialmente notorio en el parámetro Rpk. Los resultados obtenidos muestran que un trabajo riguroso en la optimización de los parámetros de rectificado y de diamantado es clave de cara a conseguir que las piezas cumplan los requerimientos marcados.

El hecho de que los valores de Rvk sean muy elevados es un aspecto, como se ha comentado antes muy beneficioso y buscado. Este tipo de perfiles de rugosidad es típico en rectificado. En la Figura 5 se puede ver el perfil de rugosidad de la pieza tras el ensayo 4. En este caso, habrá que tener en cuenta que de cara a mejorar la calidad de la pieza en la fase de superacabado, la muela utilizada va a tener que tener una alta capacidad de arranque de material. Los valores bajos de Rpk obtenidos implican la poca presencia de picos, y por tanto la necesidad de arrancar gran cantidad de material para mejorar la superficie.

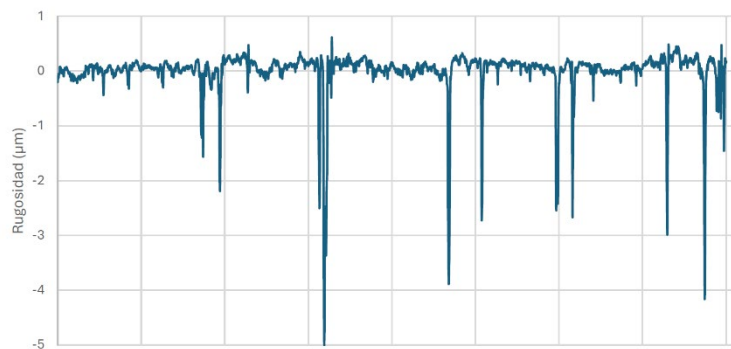


Figura 5: Perfil de superficie rectificada en el ensayo 4

En cuanto al aspecto de la pieza (Figura 6), se observa que al finalizar cada uno de los ensayos realizados aparecen unas marcas. La presencia de estas marcas se ha observado en todos los ensayos, pero de diferentes tamaños, ya que la anchura de éstas coincide con la anchura de solapamiento (st) de cada uno de los ensayos. Estas marcas no suponen un empeoramiento de la rugosidad, pero deben ser eliminadas en la fase de superacabado, lo que refuerza la necesidad de utilizar un tipo de muela que, además de permitir llegar a valores muy bajos de Ra, tenga una capacidad de arranque de material suficiente para eliminar estas marcas.

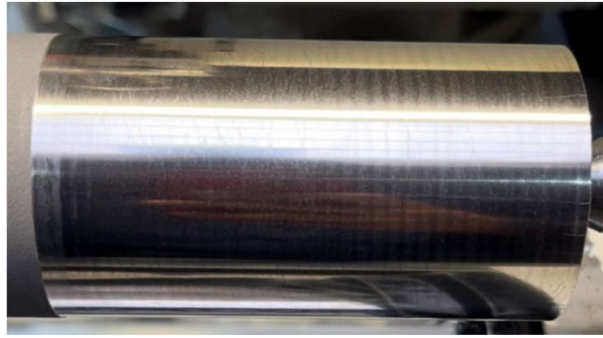


Figura 6: Pieza obtenida en el proceso de semidesbaste

4. Conclusiones

El estudio realizado sobre el comportamiento de la muela de silicio de carburo vitrificada durante el rectificado de la pieza recubierta con Cr3+ en esta primera fase de rectificado ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

- A pesar de que la muela se ha comportado de manera eficiente en el arranque de material, se ha observado que la muela sufre mucho desgaste. Este desgaste se ha observado tanto en las fases iniciales de desbaste, es decir, cuando la capa de recubrimiento era la de partida, como en las fases de semiacabado cuando la pieza ya había sufrido varias pasadas de rectificado.
- En los procesos de rectificado se concluye que una velocidad de pieza y de avance más bajos implican una mejora de rugosidad en la pieza. Estos cumplen con los requerimientos planteados con Ra de entorno a 0,17 μm , y que establece unas condiciones de partida adecuadas para tratar de alcanzar el superacabado
- Sin embargo, analizando el perfil de rugosidad se observa la presencia de unos valles muy profundos, lo que puede atribuirse al propio proceso de rectificado e implica una muela con cierta capacidad de arranque de material para el proceso de superacabado.
- El aspecto de la pieza al finalizar los ensayos ha mostrado la presencia de unas marcas que aparecen durante el proceso de vaivén y que coinciden con la anchura de solapamiento. Estas marcas no se han traducido en valores elevados de rugosidad, pero si suponen un aspecto negativo desde el punto de vista estético, y que, por ello, se tratarán de eliminar durante la siguiente fase de superacabado.

5. Agradecimientos

Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Gobierno Vasco por su apoyo al grupo de investigación IT1573-22 perteneciente a la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea.

6. Referencias

- [1] Ghosh G., Sidpara A., Bandyopadhyay P. P., “Theoretical and experimental investigation of material removal rate in shape adaptive grinding of HVOF sprayed WC-Co coating”, *Precision Engineering* **72**, 627–639 (2021)
- [2] Petry T., Knowles R., Meads R., “An analysis of the proposed REACH regulation”, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **44**, 24–32 (2006)
- [3] Wang S., Ma C., Walsh F. C., “Alternative tribological coatings to electrodeposited hard chromium: a critical review”, *Transactions of the IMF* **98**, 173–185 (2020)
- [4] Cherguy O., Cabanettes F., Han S., Rech J., “Modeling surface roughness profiles generated by the belt finishing process of a 27MnCr5 carburized steel”, *Precision Engineering* **88**, 148–163 (2024)
- [5] Hashimoto F., Yamaguchi H., Krajnik P., Wegener K., Chaudhari R., Hoffmeister H. W., Kuster F., “Abrasive fine-finishing technology”, *CIRP Annals* **65**, 597–620 (2016)
- [6] Brinksmeier E., Heinzl C., Bleil N., “Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system”, *Journal of Material Processing Twchnology* **209**, 6117–6123 (2009)
- [7] Brinksmeier E., Mutlugünes Y., Klocke F., Aurich J. C., Shore P., Ohmori H., “Ultra-precision grinding”, *CIRP Annals* **59**, 652–671 (2010)
- [8] Beaucamp A., Kirsch B., Zhu W., “Advances in grinding tools and abrasives”, *CIRP Annals* **71**, 623–646, (2022)

- [9] Luo S. Y., Liao Y. S., Chou C. C., Chen J.P., “Analysis of the wear of a resin-bonded diamond wheel in the grinding of tungsten carbide”, *Journal of Materials Processing Technology* **69**, 289-296 (1997)
- [10] Abdullah A., Pak A., Farahi M., Barzegari M., “Profile wear of resin-bonded nickelcoated diamond wheel and roughness in creep-feed grinding of cemented tungsten carbide”, *Journal of Materials Processing Technology* **183**,165-168 (2007)
- [11] Kar S., Kumar S., Bandyopadhyay P. P., Soumitra P., “Grinding of hard and brittle ceramic coatings: Force analysis”, *Journal of the European Ceramic Society* **40**, 1453-1461 (2020)
- [12] Xiao H., Yin S., Zhou P., Wu H., “Prediction of grinding parameters based on specific surface integrity of hard-brittle materials”, *Journal of Manufacturing Processes* **134**, 659-679 (2025)
- [13] Zhao B., Dai H., Wang Y., Zhou P., “Optimization of grinding process for hard and brittle materials based on damage evolution mechanism”, *Precision Engineering* **86**, 376-387 (2024)