

Tratamiento de fillos de corte por arrastre planetario "Dragging" y predicción de redondeo de filo en herramientas de carburo

Cristian Pérez-Salinas¹, Luis Norberto López de Lacalle², Pablo Fernández-Lucio³, Octavio Pereira-Neto⁴

¹Grupo de investigación e innovación en ingeniería mecánica – GI3M, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador. Email: cf.perez@uta.edu.ec

²Grupo de Fabricación de alto rendimiento, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España. Email: norberto.lzlacalle@ehu.eus

³Grupo de Fabricación de alto rendimiento, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España. Email: pablo.fernandezd@ehu.eus

⁴Grupo de Fabricación de alto rendimiento, Centro de Fabricación Avanzada para la Aeronáutica (CFAA), Universidad del País Vasco (UPV/EHU), España. Email: octaviomanuel.pereira@ehu.eus

Resumen

El presente trabajo describe el uso del proceso de preparación de filo de corte "Dragging" (DF) con 2 tamaños de grano y tres porcentajes de mezcla. Se manipularon tanto la profundidad de inmersión de la herramienta en el medio abrasivo y el tiempo de duración del arrastre; además, se efectuó un análisis Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) y predicción de radio de filo (ER) mediante Machine Learning por Artificial Neural Network (ANN). Los resultados alcanzados fueron: que los factores influyentes sobre el ER en orden de importancia fueron Profundidad de arrastre, tiempo de arrastre, porcentaje de mezcla y tamaño de grano respectivamente, la precisión de reproducción del ER es confiable en comparación con procesos tradicionales como el cepillado y el blasting, y la precisión de predicción del ER de preparación con ANN fue del 94 % evidenciando la eficacia del algoritmo. Finalmente se demuestra que el DF tiene viabilidad confiable en la aplicación de preparación de fillos en herramientas de carburo para procesos de arranque de viruta.

Palabras clave: Afilado, Tratamiento de filo por arrastre, Herramientas carburo, Análisis R&R, Predicción ANN.

Abstract

The present work describes the use of the cutting-edge preparation process "Dragging" (DF) with 2 grain sizes and three mixing percentages. Both the immersion depth of the tool in the abrasive medium and the dragging duration time were manipulated; in addition, a Repeatability and Reproducibility (R&R) analysis and prediction of cutting-edge radius (ER) were carried out by Machine Learning by Artificial Neural network (ANN). The results achieved were that the influencing factors on the ER in order of importance were drag depth, drag time, mixing percentage and grain size respectively, the reproduction accuracy of the ER is reliable in comparison with traditional processes such as brushing and blasting, and the prediction accuracy of the ER of preparation with ANN was 94%, evidencing the effectiveness of the algorithm. In the end, it is demonstrated that the DF has reliable feasibility in the application of cutting-edge preparation on carbide tools for chip removal processes.

Keywords: Sharpening; Drag finishing; Carbide tools; R&R analysis, Prediction ANN.

1. Introducción

El rendimiento de las herramientas para el arranque de viruta tiene relación directa con la macro y micro geometría de la herramienta, los materiales de corte y

los sistemas de recubrimiento. Entendiendo a la micro geometría de las herramientas de corte como la preparación del borde de filo de corte, estudios recientes muestran que la micro geometría de la herramienta tiene una influencia muy importante en el

proceso de corte [1], [2]. Además, extender la vida útil del filo de corte es posible con una forma específica dependiente de la operación de arranque de viruta y sus condiciones de corte [3]–[6]. En este sentido, el lograr la geometría ideal para cada proceso de mecanizado, es la principal preocupación de los investigadores y de la industria manufacturera.

Existen procesos de preparación de fillos de corte tradicionales que son empleados por fabricantes de herramientas de corte y otras de nuevas tecnologías que están en desarrollo o proceso de implementación [2]. Cada una de ellas tiene sus ventajas y limitaciones. Un proceso que ha tenido relevancia y gran utilidad en los últimos años es el proceso de preparación por arrastre en abrasivo estático “Dragging” o “Drag Finishing” [7]. Su bajo costo y versatilidad para trabajar con el afilado de geometrías complejas son ventajas que le otorgan relevancia de utilidad [8]. Sin embargo, en la literatura especializada existe poca información sobre la metodología de trabajo, sus limitaciones, su precisión y sus parámetros influyentes en la obtención de la microgeometría de corte.

La microgeometría de filo de la herramienta conseguida por cualquier proceso de preparación del borde posee características identificables como la topografía superficial alcanzada [3]. Las pequeñas deformaciones y astillados a lo largo de la superficie del filo de corte definen dicha topografía. Se requiere que la topografía en el borde de corte sea con la mayor nitidez posible ya que incide en la calidad superficial del mecanizado. Sin embargo, la nitidez depende del proceso de preparación del borde de corte aplicada.

Los resultados de las mediciones y ensayos están siempre sujetos a una determinada incertidumbre. Tradicionalmente, la exactitud, la linealidad y la estabilidad eran características que se consideraban para evaluar los sistemas de medición. Sin embargo, en actualidad se reconoce la necesidad de incluir al sistema de medición propiedades importantes como la repetibilidad y la reproducibilidad *R&R*. El análisis *R&R* se aplica a varias áreas de interés como la validación de métodos de calibración o la variabilidad de mediciones e instrumentos, entre otros. Sin embargo, cabe resaltar el hecho que es útil para evaluar la incertidumbre de medición y la deriva (estabilidad) de instrumentos y equipos [9], [10]. En este sentido, su utilidad es procedente para evaluar el proceso *DF* para obtención de radios de fillos de corte. Para determinar si un sistema de medición puede evaluar el rendimiento de un proceso, se necesitan estimaciones adecuadas de la variación del proceso y la variación de las mediciones [10], [11].

Debido al auge de la industria 4.0 la inclusión del Machine Learning para monitorización de procesos es un área de suma importancia y alta demanda en

diferentes industrias. Las redes neuronales artificiales son un tipo de inteligencia artificial que permiten la predicción de variables. Autores como [12], [13] utilizaron el modelo de red neuronal artificial para estudiar y predecir el desgaste de herramientas a partir de parámetros de trabajo de la máquina y observaron la eficacia de los algoritmos obteniendo pequeños errores tanto en el entrenamiento como en la predicción. Si bien es cierto estos trabajos no son iguales al proceso de este estudio; sin embargo, la naturaleza es similar ya que el desgaste del filo de la herramienta en el proceso de mecanizado es natural y la preparación de este es un desgaste intencionado.

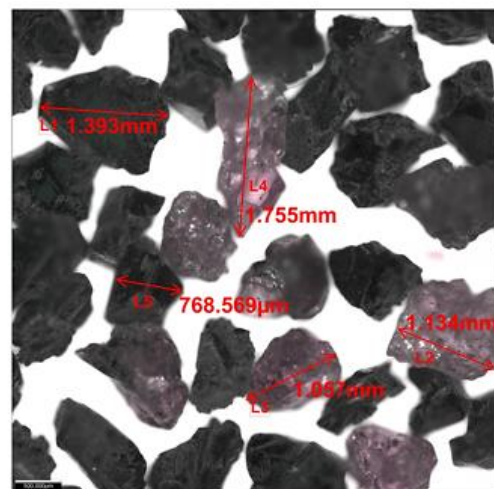
El presente trabajo describe el uso del proceso de preparación de filo de corte *DF* y todas sus características que permitirán entender mejor su proceso; así como también verificar su precisión, reproducibilidad, limitaciones y parámetros influyentes aplicados a herramientas de carburo con material abrasivo Alúmina (Al_2O_3) y Carburo de Silicio (SiC) en dos tamaños de grano.

2. Metodología

En este apartado se explica los materiales y equipos empleados, así como también el diseño experimental ejecutado y los métodos para los análisis realizados: resultados experimentales, análisis *R&R* y predicción de *ER* respectivamente.

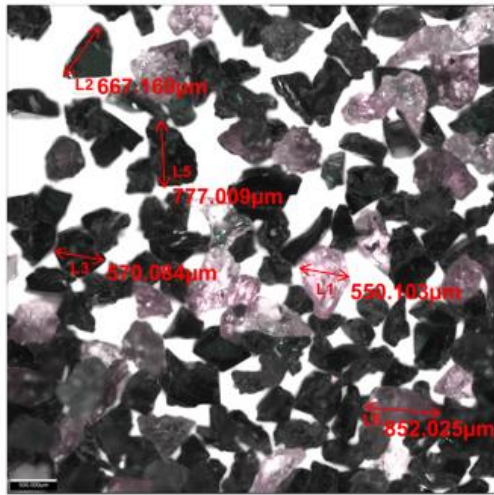
2.1. Materiales y equipos

Se emplearon granos abrasivos de Carburo de Silicio (SiC) y Alúmina (Al_2O_3) en dos tamaños diferentes 24 y 46 según la apertura de tamiz dada por la Norma ASTM D E 11-70 (Figura 1a y 1b).



Material	Tamaño de grano [µm]	Apertura-Tamiz ASTM	Densidad [g/cm ³]	Dureza [Mohs]
SiC	750	46	1,45	9,4
Al ₂ O ₃	750	46	1,83	9,0

(a)



Material	Tama1o de grano [µm]	Apertura-Tamiz ASTM	Densidad [g/cm3]	Dureza [Mohs]
SiC	390	24	1,47	9,4
Al ₂ O ₃	390	24	1,68	9,0

(b)

Figura 1. Granos abrasivos empleados en la preparaci3n de filo: a) Tama1o 750 µm, b) Tama1o 390 µm. Fuente: Elaboraci3n propia

La herramienta ensayada (Figura 2), fue una plaquita triangular para operaci3n de torneado sin recubrimiento de Carburo de Wolframio.

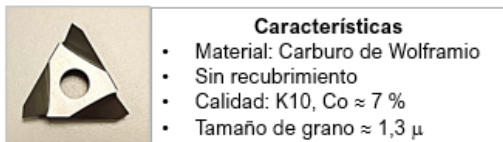


Figura 2. Herramienta sometida al proceso Drag Finishing (DF). Fuente: Elaboraci3n propia.

2.2. Dise1o y ejecuci3n experimental

El esquema de la experimentaci3n se detalla en la Figura 3. La metodolog1a para la ejecuci3n de los

experimentos consisti3 en variar tres niveles de profundidad de arrastre (ID), tres porcentajes de mezcla de los abrasivos (RM) con dos tama1os de granos (GZ) y tiempos de duraci3n del arrastre (DT) para alcanzar rangos de radios recomendados en la literatura para el mecanizado efectivo de las herramientas de corte. Las variantes se muestran en la Tabla 1.

Una vez realizado el arrastre en los par1metros indicados, se mide el ER mediante un equipo de medici3n de perfil TMAlicona InfiniteFocusG5. Para contrastar la topograf1a y calidad superficial alcanzada en el borde de corte, se captur3 im1genes de la zona del tratamiento y mediciones de rugosidad superficial respectivamente. Con el mismo equipo, la medici3n de radio de perfil se efectu3 con una lente de 10X y, tanto la inspecci3n topogr1fica como la medici3n de rugosidad se efectu3 con una lente de 50X.

Tabla 1. Contribuci3n de variables en el an1lisis R&R

Inserto	I	II	III
Tipo de abrasivo	SiC	Al ₂ O ₃	-
Tama1o de grano [µm]	390 (A)	390+750 (AB)	750 (B)
Porcentaje en peso de SiC [%]	50	66	75
Tiempo de arrastre [min]	10/10	15/15	20/20

Fuente: Elaboraci3n propia.

2.3. An1lisis R&R

Los lineamientos para el c1lculo de la Repetibilidad y Reproducibilidad est1 dado por la norma ISO 5725-2:2019. La Variaci3n del Proceso: est1 compuesta por la variaci3n de parte a parte y de la medici3n. Se puede estimar a partir de una muestra grande de datos hist3ricos o utilizando las partes incluidas en el estudio. Al no poseer datos hist3ricos, se emplea un n1mero de

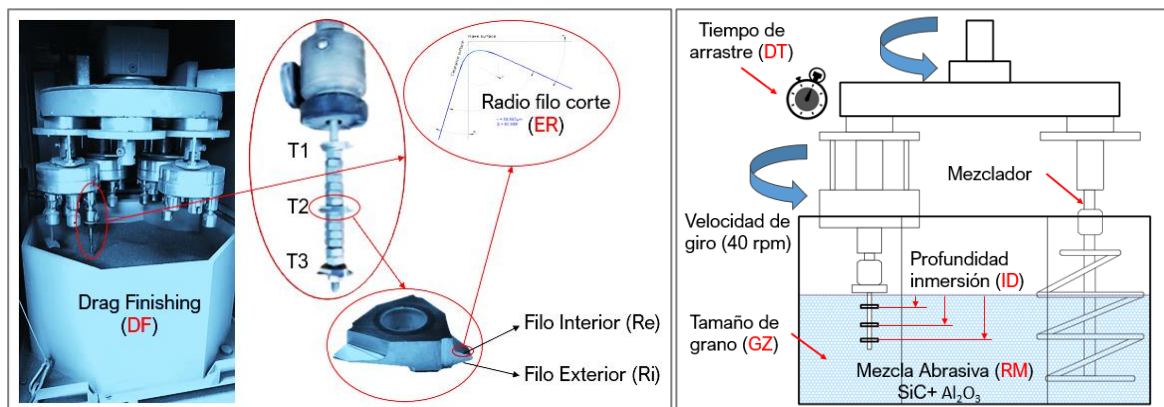


Figura 3. Esquema experimental. Fuente: Elaboraci3n propia.

24 partes o mediciones que es mayor que el requisito típico de 10 partes. *La Variación de la Medición*: estimada a partir de las partes, se divide en Reproducibilidad y Repetibilidad. A más de las 24 partes elegidas se emplea las mediciones con 3 operadores, requisito típico del análisis *R&R*. Los 3 técnicos realizaron la medición del *ER* de forma aleatoria de las partes. Las 24 partes están compuestas por mediciones de *ER* a tiempos de *DF* de 0, 20, 30, 40 min; a 3 *ID* y 2 ubicaciones distintas. Se efectúan 3 réplicas de las 24 mediciones. Por lo tanto, cada técnico efectúa 72 mediciones dando un total de 210 mediciones.

2.4. Predicción de radio de filo de corte (*ER*).

A partir de los resultados experimentales alcanzados se discute sobre los mismos y se aplica una predicción de radio de preparación mediante inteligencia artificial (red neuronal artificial *ANN*). La metodología aplicada se describe en el figura 4.

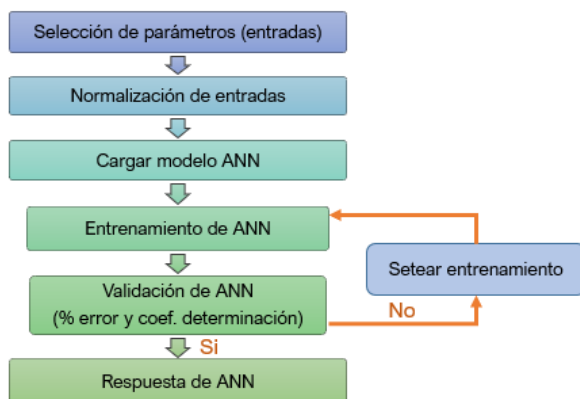


Figura 4. Metodología de predicción de radio de filo de corte *ER*. Fuente: Elaboración propia

El conjunto de datos experimentales utilizados para la etapa de entrenamiento se dividió mediante validación cruzada en: 80% para entrenamiento y 20% para validación. Se desarrolló con un esquema neuronal de feed-forward y backpropagation sobre el total de datos experimentales.

3. Resultados y discusión

En este apartado se detalla los resultados en cuanto al comportamiento e influencia de los factores sobre *ER*, los resultados del análisis *R&R* y la precisión de predicción a través de la red neuronal artificial.

3.1. Influencia y comportamiento de factores

La Figura 5 muestra la incidencia de cada parámetro cuantitativo manipulado en el experimento denominados factores. En general, cada factor tiene una incidencia significativa sobre *ER*, lo que quiere

decir que el valor de seteo de cada uno de ellos es importante a la hora de obtener un *ER* específico en una herramienta dada.

La influencia es similar tanto para el *ER* interno (*Ri*) como externo, siendo mayor influenciado en el *ER* externo (*Re*). Esto se debe al supuesto de la ubicación más profunda donde la abrasión del arrastre es mayor. En cuanto al factor tiempo (*DT*), la influencia se incrementa a medida que aumenta el tiempo, llegando a obtenerse un radio de 20 μm y 26 μm para *Ri* y *Re* respectivamente. La influencia del tamaño de grano (*GZ*) tiene relación directa con *ER*, es decir a un *GZ* grande se obtiene un *ER* grande por el contrario un menor *GZ* nos dará un *ER* pequeño. La combinación de tamaños de grano abrasivo resultó en la obtención de un *ER* medio relativo.

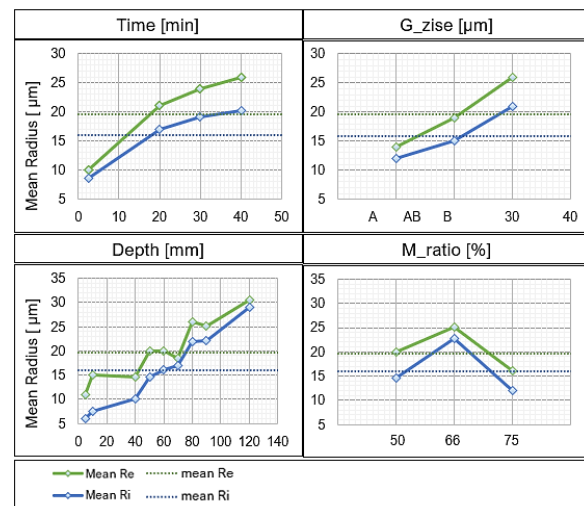


Figura 5. Efecto de parámetros sobre el radio de filo de corte *ER*. Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la profundidad de arrastre (*ID*), la tendencia general nos indica que a mayor *ID* mayor *ER* se obtiene. También se puede notar que a la máxima profundidad ensayada el valor del radio de filo de corte dado por *Re* y *Ri* tienden a ser muy cercanas en valor, lo que podría darse que el valor de *Re* y *Ri* llegaran a ser iguales a una profundidad mayor. La caída de *Re* a una profundidad de arrastre de 70 mm mostradas en la Figura 5, se debe a la ejecución ciertos ensayos del arrastre sin el uso del mezclador (Figura 2). Las variaciones se minimizaron con el uso de mezclador, que además de uniformizar la mezcla de forma permanente ayuda a evitar segregaciones o la aparición del efecto de cáscara de Nuez [14], [15]. Finalmente el efecto que tiene el porcentaje de SiC sobre el radio de filo de la herramienta presentó un comportamiento particular. A un porcentaje de SiC en la mezcla (*RM*) del 66% se obtiene un *ER* mayor que el obtenido con un *RM* del 50% y 75% respectivamente, siendo el *RM* de 75% con el cual se obtuvo los *ER* relativamente más pequeños.

El efecto combinado de DT e ID sobre ER se puede observar en la Figura 6. En primera instancia se muestra los valores promedios del incremento de Re y Ri en el tiempo partiendo de radios originales de la herramienta entre 9 a 7 μm llegando a 26 y 20 μm respectivamente. El radio externo Re siempre fue mayor que Ri desde el ER original medido antes del tratamiento. Por otra parte, tambi3n en la Figura 6 se muestra el progreso de ER obtenido a diferentes profundidades ID desde 5 a 120 mm representados por los puntos A hasta I. Se puede observar que el efecto combinado de DT e ID sobre ER tiene una relaci3n directa incremental; es decir, que ER aumenta a medida que se incrementa DT e ID .

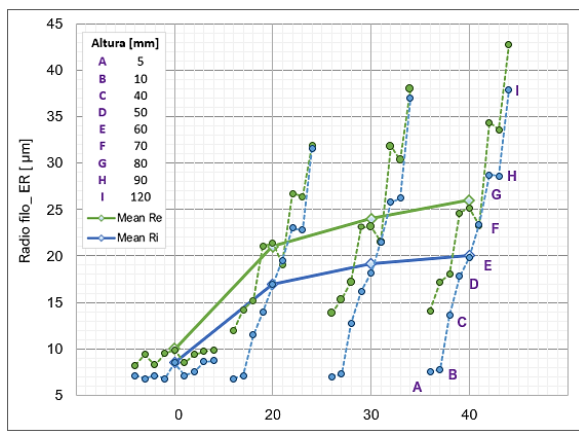
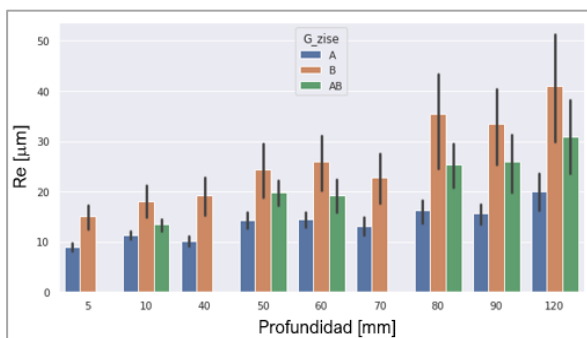
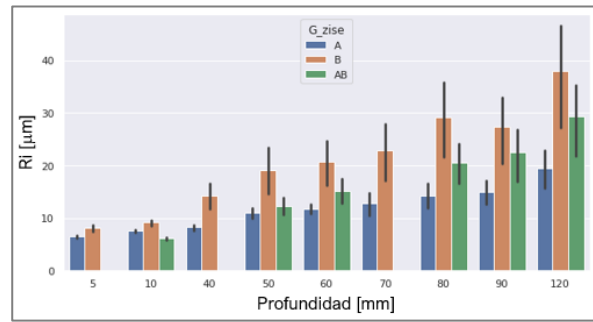


Figura 6. Efecto combinado del tiempo de arrastre DT y la profundidad de arrastre ID sobre el radio de filo de corte ER . Fuente: Elaboraci3n propia

De la misma manera el efecto combinado del tama1o de grano GZ y la profundidad de arrastre ID causa un incremento en ER (Figura 7). En este caso, tambi3n el Re obtenido es mayor que Ri . Se supone que la causa de que el Re es mayor que Ri se debe a que Ri se obtiene por el contacto frontal del grano por el arrastre; en cambio Re adem3s del contacto frontal tambi3n la fuerza de arrastre se aumenta por la presi3n mayor que soporta Re por su ubicaci3n en el proceso (Figura 1).



a)



b)

Figura 7. Efecto combinado del tama1o de grano y profundidad de arrastre sobre el radio de filo de corte ER expresado en: a) Re y b) Ri . Fuente: Elaboraci3n propia

3.2. An3lisis de la Rugosidad superficial en ER

La rugosidad alcanzada en la superficie del radio de filo de herramienta ER presenta uniformidad en cuanto al Ra se refiere; sin embargo, el Rz difiere sus valores entre los fillos exterior e inferior (Figura 7a y 7b). En general la rugosidad es mayor en el filo exterior que en el interior y la tendencia de Ra es mucho m3s uniforme que Rz . Por definici3n Rz es m3s sensible a la detecci3n de imperfecciones en la superficie mecanizadas; por lo que es utilizada ampliamente para el control y monitorizaci3n de irregularidades superficiales [16]–[18]. Los valores de Rz obtenidas por "Drag Finishing" (DF) es menor o igual que las obtenidas originalmente en la fabricaci3n de insertos por operaci3n de rectificaci3n [17], [18].

Tomando en cuenta el efecto producido por el porcentaje de SiC en la mezcla abrasiva, se puede notar que la menor presencia de SiC permite alcanzar un Rz mayor que con una mayor inclusi3n de SiC en la mezcla (Figura 7a). Lo que quiere decir que la presencia de Al3mina en un 50% en la mezcla tiene mayor capacidad abrasiva, lo que implica dejar mayor defecto superficial. Para ilustrar los defectos resultantes, en la Figura 7 se presentan im3genes del borde de corte, donde se efectu3 las mediciones de rugosidad. Se identifica la presencia de perturbaciones y astillados en ciertas zonas del borde de corte, lo que implica que estos defectos son el resultado del tratamiento original por rectificaci3n y es replicado por el proceso aplicado en este estudio. Finalmente, en cuanto al Ra se puede observar que su valor tiende a ser constante independientemente de ID .

3.3. An3lisis R&R

Los resultados del an3lisis de Repetibilidad y Reproducibilidad $R\&R$ se muestran en la Tabla 2. El an3lisis indica que la contribuci3n de la repetibilidad es mayor que la reproducibilidad en la obtenci3n ER del proceso.

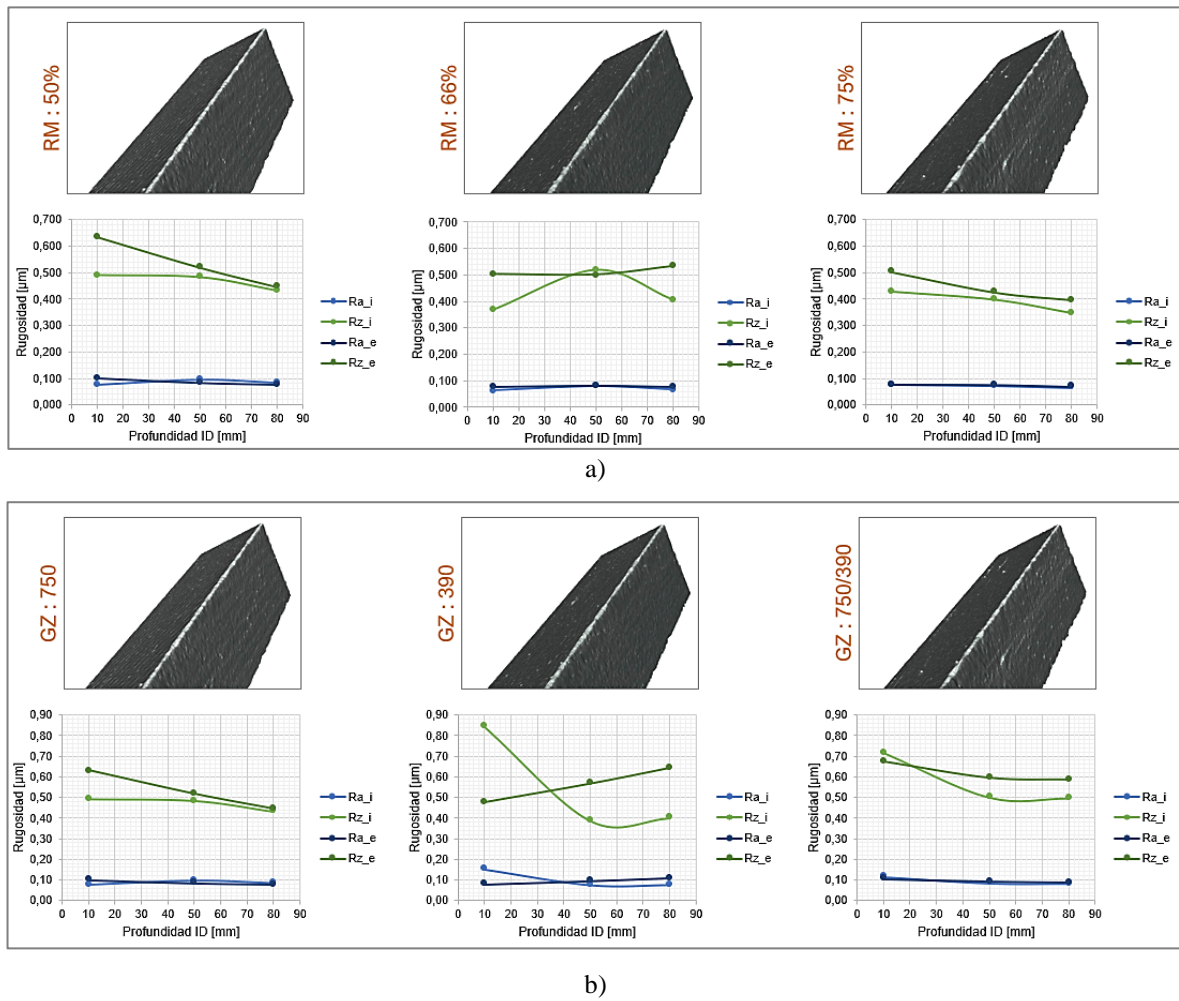


Figura 8. Comportamiento de la rugosidad superficial ante, a) Porcentaje de Carburo de Silicio *RM*, b) Tamaño de grano abrasivo *GM*. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Contribución de variables en el análisis *R&R*

Fuente	Desv. Estándar (DE)	Var. Estudio (6 × DE)	%Var. Estudio (%VE)
Gage R&R total	1,9977	11,986	19,35
Repetibilidad	1,5844	9,5067	15,35
Reproducibilidad	1,2167	7,2999	11,78
Operador	0,2385	1,4311	2,31
Operador*Ref.	1,193	7,1582	11,55
Parte a parte	10,1303	60,7816	98,11
Variación total	10,3254	61,9522	100

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran las fuentes de variación del sistema de medición en la obtención del radio de filo (medida de *ER*). En primer lugar, nos muestra que la variación del sistema de medición es igual al 19,35% de la variación del proceso. Lo que indica que el sistema se encuentra en la zona marginal (Figura 9), donde la aceptación es posible siempre y cuando se conozca las limitaciones de la misma, la importancia de la aplicación u el costo [19], [20].

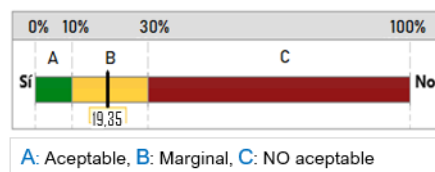


Figura 9. Zonas de determinación de la capacidad de sistema de medición, regla general. Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, se obtuvo que la componente de repetición de cada prueba (Repetitibilidad) tiene una variación de medición del 79,3% y representa el 15,3% de la variación total del proceso; en cambio, la componente referente a los operadores o técnicos (Reproducibilidad) posee una variación en la medición del 60,9% lo que representa el 11,8% de la variación total del proceso. En la práctica significa que las mediciones obtenidas por los tres técnicos u operarios son no son muy dispersas. Esto se ilustra en la Figura 10 y en la Figura 11. Se puede observar que las

mediciones del operador 1 y 3 son similares, en tanto que el operador 2 sus medidas difieren un poco. Esto se refleja en una media y rango de medidas mayor a los otros dos operadores.

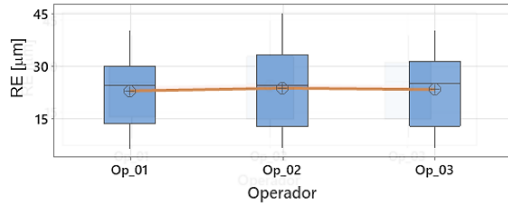


Figura 10. Variaci3n de medici3n por operario. Fuente: Elaboraci3n propia

El resultado encontrado con en el presente an3lisis es concordante al criterio dado por [8], donde se expresa que el proceso de "Drag Finishing" es un m3todo de preparaci3n de filo de corte aplicable para la mejora en el rendimiento de corte en cuanto a la precisi3n y repetibilidad se refiere.

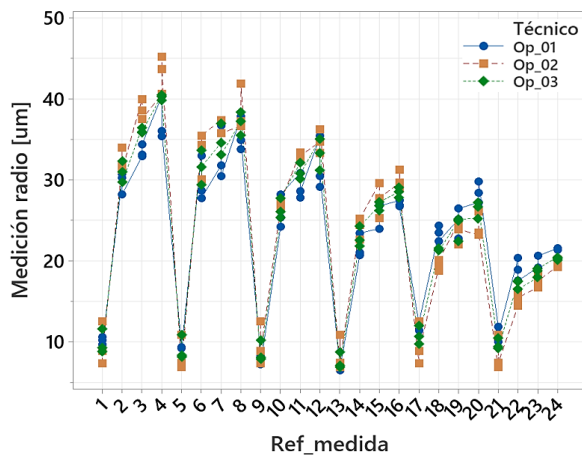


Figura 11. Gr3fica de dispersi3n de medici3n de radio por referencia de medici3n del an3lisis R&R. Fuente: Elaboraci3n propia.

3.4. Predicci3n de radio de filo por ANN

En la validaci3n del algoritmo para el entrenamiento, se necesit3 de 363 3pocas para hallar el mejor entrenamiento. Es decir que los errores ya no se reducen sino que se estabilizan (Figura 12). Se obtuvo un coeficiente de determinaci3n de 0,961 con una desviaci3n estandar de 0,0104. Por lo tanto, se continu3 con la predicci3n.

Como se conoce que, los diferentes pesos que conectan los elementos en la red neuronal se ajustan y se acercan al valor de salida objetivo. Por lo tanto, la ecuaci3n 1 representa la actualizaci3n de los pesos sin3pticos, en base al error calculado en cada neurona. Donde $w'ji(n)$ representan los pesos ajustados, $wji(n)$ son los pesos anteriores y $\Delta wji(n)$ es la correcci3n de peso sin3ptica.

$$cw'ji(n) = wji(n) + \Delta wji(n) \quad (\text{ecuaci3n 1})$$

Los resultados de predicci3n por ANN se resumen en la Tabla 2. Dependiendo del error absoluto medio (MAE), error cuadr3tico medio (MSE) y el coeficiente de determinaci3n, se ha llegado a una arquitectura de red 3ptima. La Figura 12 muestra la variaci3n de los errores de entrenamiento y validaci3n con el n3mero de iteraciones para la red utilizada en el presente caso.

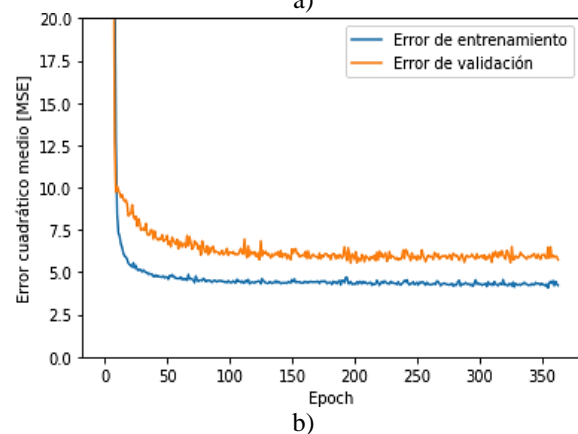
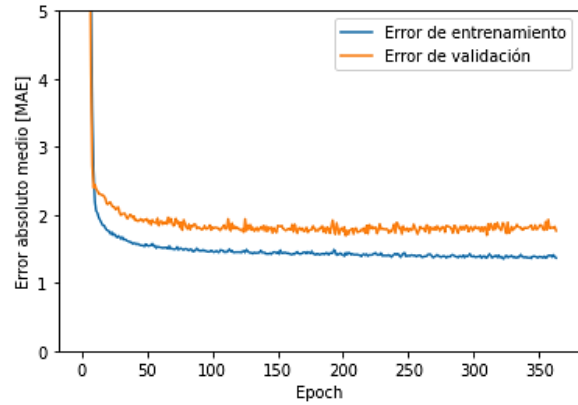


Figura 12. Errores de predicci3n de aplicaci3n ANN, a) MAE, b) MSE. Fuente: Elaboraci3n propia

Tabla 2. Resumen de resultados de predicci3n ANN.

Conjunto de datos	MAE	MSE	R ²
Entrenamiento	0,0134	0,0417	0,943
Validaci3n	0,0176	0,0573	

Fuente: Elaboraci3n propia

El ER predicho por la red neuronal se ha comparado con los correspondientes valores experimentales reales y se muestran en la Figura 13. Adem3s, se encontr3 que el porcentaje promedio de errores de predicci3n es de 8,81% comparados con los valores experimentales reales del desgaste del flanco.

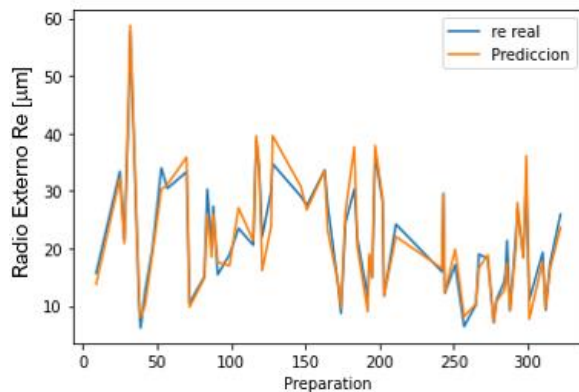


Figura 13. Comparación del radio experimental con el predicho por ANN. Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

- Los parámetros incidentes en la obtención de un radio de borde de corte fueron en orden de importancia: la profundidad de inmersión, el tiempo de arrastre, porcentaje de mezcla de abrasivos y tamaño de abrasivos.
- Comparando los resultados de Re y Ri correspondientes al filo externo e interno, nos permite concluir que la incidencia de la ubicación de la herramienta es muy importante a la hora de obtener un valor específico de ER . A razón de que la diferencia de profundidades entre ellos es muy pequeña, pero la ubicación permitió tener ER diferentes.
- En lo que ha rugosidad se refiere, se pudo identificar que la incidencia es mayor por parte de la tasa de inclusión de abrasivos, que el tamaño de grano. Además la variación de defecto superficial es evidente mediante Rz que con Ra .
- En cuanto a precisión de reproducción del radio de filo de la herramienta es muy aceptable en comparación con proceso tradicionales como el cepillado y el blasting.
- La precisión de predicción del radio de preparación con el ANN fue del 94%, lo que demuestra la eficacia del algoritmo.
- La limitación del proceso DF tiene que ver esencialmente con las dimensiones de la herramienta por ejemplo brochas de gran longitud, debido a que dificultaría su ubicación, sujeción y por ende la reproducibilidad de la geometría del filo en todos los dientes.

5. Agradecimientos

Se agradece a Dr. Ibon Azkona y a la empresa Metal Estalki por el apoyo en los tratamientos aplicados, y consideraciones generales.

Se agradece al aula AIMS por el apoyo en la aplicación de algoritmos avanzados, así como al GV por su apoyo en el proyecto Opticed Elkartek.

Los datos de calidad se han contrastado con resultados del proyecto (QUOLINK) Ministerio de Ciencia e Innovación 2021, y los tratamientos del filo por los medios del proyecto MICINN PDC2021-121792-I00. Se agradece a la Universidad Técnica de Ambato por el apoyo a la investigación.

6. Referencias

- [1] B. Bergmann and T. Grove, "Basic principles for the design of cutting edge roundings," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 73–78, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CIRP.2018.04.019.
- [2] K. Zhuang, C. Fu, J. Weng, and C. Hu, "Cutting edge microgeometries in metal cutting: a review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 7–8, pp. 2045–2092, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07558-6.
- [3] C. Cortés, "Cutting Edge Preparation of Precision Cutting Tools by Applying Micro ... - Carlos Julio Cortés Rodríguez - Google Libros," 2009. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NfRFEgFRmD4C&oi=fnd&pg=PR3&ots=Gj_y-fqICY&sig=kDgyZgCVllbJtQJI4f5ft3D7o&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed Mar. 08, 2022).
- [4] K. D. Bouzakis *et al.*, "Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 264–273, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2014.05.003.
- [5] B. Karpuschewski, O. Byelyayev, and V. S. Maiboroda, "Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills," *CIRP Annals*, vol. 58, no. 1, pp. 295–298, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.CIRP.2009.03.046.
- [6] F. C. Magalhães, C. E. H. Ventura, A. M. Abrão, and B. Denkena, "Experimental and numerical analysis of hard turning with multi-chamfered cutting edges," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 49, pp. 126–134, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2019.11.025.
- [7] P. C. Priarone, S. Rizzuti, L. Settineri, and G. Vergnano, "Effects of cutting angle, edge preparation, and nano-structured coating on milling performance of a gamma titanium aluminide," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 12, pp. 2619–2628, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2012.07.021.

- [8] B. Denkena and D. Biermann, "Cutting edge geometries," *CIRP Annals*, vol. 63, no. 2, pp. 631–653, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.CIRP.2014.05.009.
- [9] A. Zanobini, B. Sereni, M. Catelani, and L. Ciani, "Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems," *Measurement*, vol. 86, pp. 125–132, May 2016, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2016.02.041.
- [10] L. Maria Mendes Ara3jo, R. Gomes Nobrega Paiva, R. Santana Peruchi, P. Rotela Junior, and J. Henrique de Freitas Gomes, "New indicators for measurement error detection in GR&R studies," *Measurement*, vol. 140, pp. 557–564, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.03.059.
- [11] A. Shirodkar and S. Rane, "Evaluation of Coordinate measuring machine using Gage Repeatability & Reproducibility," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 12, no. 1, pp. 84–90, Feb. 2021, doi: 10.1007/S13198-020-01050-2/TABLES/9.
- [12] N. Ghosh *et al.*, "Estimation of tool wear during CNC milling using neural network-based sensor fusion," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 466–479, Jan. 2007, doi: 10.1016/J.YMSSP.2005.10.010.
- [13] S. S. Panda, D. Chakraborty, and S. K. Pal, "Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network," *Applied Soft Computing*, vol. 8, no. 2, pp. 858–871, Mar. 2008, doi: 10.1016/J.ASOC.2007.07.003.
- [14] C. P. Schlick, Y. Fan, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow, "Granular segregation in circular tumblers: theoretical model and scaling laws," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 765, pp. 632–652, 2015, doi: 10.1017/JFM.2015.4.
- [15] N. Jain, J. M. Ottino, and R. M. Lueptow, "Combined size and density segregation and mixing in noncircular tumblers," *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, vol. 71, no. 5, p. 051301, May 2005, doi: 10.1103/PHYSREVE.71.051301/FIGURES/9/MEDIUM.
- [16] D. N3nuez, C. Arroba, H. Vaca, C. P3rez, and C. Morales, "Spray lubrication in turning processes, effects on productivity and quality," *Dyna (Spain)*, vol. 94, no. 5, pp. 561–567, 2019, doi: 10.6036/8843.
- [17] D. C. Cruz, V. L. Sordi, and C. E. H. Ventura, "Surface analysis of WC-5%Co cemented tungsten carbide cutting insert after plunge-face grinding," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 1–2, pp. 323–330, May 2020, doi: 10.1007/S00170-020-05382-Y/FIGURES/8.
- [18] D. C. Cruz, V. L. Sordi, and C. E. H. Ventura, "Assessment of the surface integrity of ground cemented tungsten carbide cutting inserts and its influence on tool wear in turning of ferritic nodular cast iron," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 37, pp. 613–622, May 2022, doi: 10.1016/J.CIRPJ.2022.03.014.
- [19] R. Aparecida Mendonça Marques, R. Bruno Dutra Pereira, R. Santana Peruchi, L. Cardoso Brand3o, J. Roberto Ferreira, and J. Paulo Davim, "Multivariate GR&R through factor analysis," *Measurement*, vol. 151, p. 107107, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.107107.
- [20] R. B. D. Pereira, R. S. Peruchi, A. P. de Paiva, S. C. da Costa, and J. R. Ferreira, "Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation," *Measurement*, vol. 82, pp. 135–144, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2015.12.033.