

Using statistical techniques to evaluate the surface roughness in 316LVM stainless steel probe subjected to comparative abrasive wear

**M. Álvarez-Luna, R. Grau, J. García-Jacomino,
R. Quintana-Puchol, A. Cruz-Crespo**

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
Carretera a Camajuaní km 5½, Santa Clara, Villa Clara, CP. 54830, Cuba. macyuri@uclv.edu.cu

Abstract

In this paper is shown a study using statistical techniques of the characterization results through atomic force microscopy (AFM) of the parameters of surface finish on Sandvik Bioline 316LVM stainless steel probes, subjected to abrasive wear. Descriptive data analysis is used to characterize the measurements, their central tendencies (means) and variability (standard deviation). The comparisons in the first part are performed using non-parametric tests (ANOVA Kruskal-Wallis) to contrast the levels of roughness acquired in each type of specimen from the three levels of fraction. There is also used the nonparametric Mann-Whitney test to compare the means ranges for every pair of groups. The second part is focused on data, considering paired samples to form a design that responds to a populations' comparison schema (nonparametric and parametric). Statistical techniques are applied to compare, with a high degree of reliability, the surface roughness of the specimens. There are also considered the abrasiveness characteristics of the abrasive powders used ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$).

Keywords: MFA, parametric tests, nonparametric tests, surface roughness.

Uso de técnicas estadísticas para evaluar la rugosidad superficial en probetas de acero inoxidable 316LVM sometidas a desgaste abrasivo comparativo

Resumen

En el presente trabajo se presenta un estudio estadístico de los resultados de la caracterización mediante microscopía de fuerza atómica (MFA) de los parámetros de acabado de superficie en probetas de acero inoxidable Sandvik Bioline 316LVM, sometidos al desgaste abrasivo. Se utiliza el análisis descriptivo de datos, para caracterizar las mediciones, sus tendencias centrales (medias) y variabilidad (desviación estándar). Las comparaciones en la primera parte se realizan utilizando pruebas no paramétricas (Análisis de Varianza de *Kruskal-Wallis*) para contrastar los niveles de rugosidad adquiridos en cada tipo de probeta respecto a los 3 niveles de fracción. Se utiliza también el test no paramétrico de *Mann-Whitney* para comparar los rangos medios de cada pareja de grupos. En la segunda parte, se enfocan los datos considerando muestras apareadas para conformar un diseño que responde a un esquema de comparación de poblaciones (no paramétrico y paramétrico). Las técnicas estadísticas aplicadas permiten comparar, con un alto grado de confiabilidad, la rugosidad superficial de las probetas. Además se valoran, las características de agresividad de los polvos abrasivos empleados ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$).

Palabras clave: MFA, tests paramétricos, tests no paramétricos, rugosidad superficial.

Introducción

Una gran parte de los métodos estadísticos suponen conocida la ley de probabilidad de la variable o las variables observadas, muchos de ellos están diseñados para inferir sobre los parámetros de esa ley de probabilidad. Como alternativa, es común el empleo de métodos no paramétricos, ya que no requieren partir del supuesto “de que las distribuciones de probabilidad o parámetros se conocen” y tienen uso en gran variedad de situaciones. Varios autores coinciden que las principales ventajas radican en que: no exigen hacer la suposición de que una población está distribuida en la forma de una curva normal o tiene otra forma especificada, son más fáciles de llevar a cabo y de entender y apenas requieren el ordenamiento formal o por rangos [1-4]. Por otra parte reconocen que sus desventajas radican en que ignoran cierta cantidad de información y que en determinados análisis no son tan eficientes como las pruebas paramétricas.

En general los procedimientos docimásticos siguen la siguiente secuencia:

- Planteamiento de hipótesis.
- Establecimiento de riesgos y cálculo del tamaño de muestra.
- Encuentro o suposición de la distribución muestral de la prueba estadística.
- Regla de decisión.

Un procedimiento popular utilizado es la prueba *U de Mann-Whitney*, la cual es el equivalente no paramétrico de la prueba *t de Student* para dos muestras. Dicha prueba se basa en una combinación de las n_1 y n_2 observaciones para formar un solo conjunto de $n_1 + n_2$ observaciones arregladas en orden creciente de magnitud.

En esencia la prueba de *Mann-Whitney* determina cuando un agregado de rangos observados es suficiente para concluir que las dos muestras aleatorias provienen de poblaciones cuyas distribuciones difieren en la tendencia central. El estadístico *U de Mann-Whitney* está dado por la ecuación:

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \tag{1}$$

El estadígrafo *U* es una función de la variable aleatoria de R_1 y de los tamaños de las mues-

tras n_1 y n_2 . Si H_0 es cierto, la ocurrencia de cualquier orden particular para las observaciones en el conjunto combinado es equiprobable. Por lo tanto, bajo H_0 , R_1 es la suma de n_1 enteros positivos seleccionados en forma aleatoria de entre los primeros $n_1 + n_2$. De acuerdo con lo anterior, puede determinarse que:

$$E(R_1) = n_1(n_1 + n_2 + 1) / 2 \tag{2}$$

$$Var(R_1) = n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1) / 12 \tag{3}$$

De la ecuación (1) se obtiene que:

$$E(U) = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - E(R_1) = n_1 n_2 / 2 \tag{4}$$

$$Var(U) = Var(R_1) = n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1) / 12 \tag{5}$$

Por otra parte si se quiere probar la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$, con base en k muestras aleatorias mutuamente independientes provenientes de poblaciones cuyas distribuciones se suponen como normales, es común el uso del procedimiento de *Kruskal-Wallis* [5, 6], el cual prueba las hipótesis nula de que los efectos de los tratamientos son los mismos, o que las k muestras aleatorias provienen de poblaciones con distribuciones idénticas [7]. Esta prueba es sensible a las diferencias en la tendencia central y es muy útil cuando se sospecha que las distribuciones de interés difieren solo en ese aspecto.

El estadígrafo de la prueba de *Kruskal-Wallis* es:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \left[\sum_{j=1}^k \frac{R_j^2}{n_j} \right] - 3(N+1) \tag{6}$$

Se supone que las k muestras provienen de poblaciones con distribuciones idénticas, con tamaños relativamente grandes (n_j) y se encuentra aproximada adecuadamente por una distribución *chi-cuadrada* con $k - 1$ grados de libertad. Este procedimiento de *Kruskal-Wallis*, se considera, en general como una extensión de la prueba *U*, de *Mann-Whitney* [8-10]. Por otra parte, para la comparación de muestras apareadas (típicamente: antes después) se utiliza el test de los signos con rangos de *Wilcoxon*. Esencialmente es una alternativa no paramétrica del test de *Student*

para muestras apareadas y mide si predominan significativamente los valores iniciales mayores (o menores) que el valor final [2].

El objetivo de este trabajo se enmarca en evaluar la rugosidad superficial en probetas de acero inoxidable 316LVM, sometidas a desgaste abrasivo comparativo, mediante técnicas estadísticas, a partir de los parámetros de superficie aportados por la caracterización con microscopía de fuerza atómica (MFA).

Parte experimental

Los polvos abrasivos utilizados para el ensayo fueron: el corindón ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) de la firma Buehler y otro producido en el laboratorio ($\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) mediante proceso SHS-AE [11, 12]. Los polvos se tamizan durante 15 minutos, tomándose las fracciones correspondientes a $(-45 +38) \mu\text{m}$, $(-53 +45) \mu\text{m}$ y $(-53 +63) \mu\text{m}$ para ambos abrasivos. Se prepara una suspensión con agua destilada en relación másica sólido: líquido=1:10. Esta suspensión es utilizada para someter a abrasión las superficies del acero 316LVM, previamente pulidas (acabado espejante) según la norma ASTM E3-01(2007) [13].

Las probetas pulidas son sometidas a desgaste abrasivo en una máquina pulidora, acoplada con un brazo mecánico, diseñado para controlar con precisión la carga aplicada y el recorrido de la probeta (Figura 1). La abrasión fue realizada durante 5 minutos a 200 RPM con una carga de 135 g para ambos polvos abrasivos.

Las muestras fueron caracterizadas por MFA en equipo marca *Agilent 5500 SPM*, en modo contacto con un nanosensor de silicio tipo PPP-CONTR-50 con $(2,0 \pm 1) \mu\text{m}$ de espesor, $(450 \pm 10) \mu\text{m}$ de longitud, $(50 \pm 7,5) \mu\text{m}$ de ancho. Las probetas se montan en el soporte y son escaneadas en modo de fuerza constante ($0,5 \text{ N/m}$). Se emplea para la adquisición de los datos el software *PicoView* versión 1.6.4 obteniéndose imágenes topográficas de la superficie de las muestras.

Los resultados obtenidos en la caracterización por MFA, son procesados mediante el software *Pico Image Basic* versión 5.0.4.5276, que basado en la norma ISO 25178 calcula una serie de parámetros de altura de superficie [14]. Se obtienen además, imágenes en 3D de la superficie de la probeta donde se puede observar en una escala

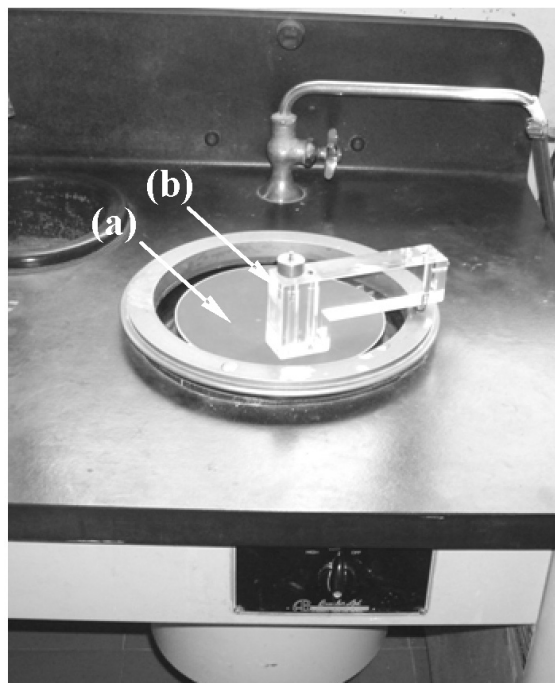


Figura 1. Banco de pulido de muestras: (a) plato rotatorio, (b) brazo soporte de la probeta.

de colores la topografía de la superficie con alta resolución y comprobar visualmente el efecto de los granos abrasivos empleados.

Los resultados de las mediciones experimentales fueron vaciados en Tablas en Excel y luego importadas al SPSS p/w versión 15,0 (*Statistical Package for the Social Sciences*) para su procesamiento estadístico [15]. El procesamiento estadístico se divide en dos partes: validación general del experimento y la comparación de poblaciones (no paramétrico y paramétrico).

Considerando que las mediciones son apareadas con ambos tipos de probetas para cada abrasivo y cada nivel de fracción granulométrica, se diseña un esquema de comparación de poblaciones (grupos) [16] como se muestra gráficamente (Figura 2):

El esquema supone 4 pruebas de hipótesis:

- V1: para demostrar que no existen diferencias significativas en la rugosidad superficial de las probetas con acabado superficial espejo que serán utilizadas para uno u otro abrasivo.
- V2: para determinar hasta qué punto existen diferencias significativas en la rugosidad

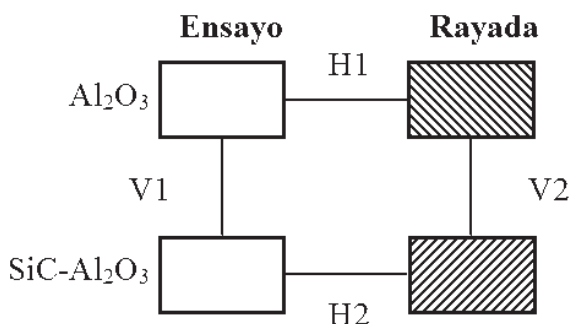


Figura 2. Esquema general de comparación de grupos.

superficial de la probeta rayada que fueron utilizadas para uno u otro abrasivo.

- H1: para ratificar que hay diferencias significativas en los niveles de rugosidad superficial entre las probetas espejo y rayadas cuando se tratan con el $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$.
- H2: para ratificar que hay diferencias significativas en los niveles de rugosidad entre las probetas espejo y rayadas cuando se tratan con el $\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$.

Las pruebas verticales (V1 y V2) son realizadas en la primera parte del procesamiento estadístico con técnicas no paramétricas (*Mann-Whitney*). La segunda parte de este procesamiento prueba las hipótesis horizontales (H1 y H2) también con técnicas no paramétricas (*Wilcoxon*). En todos los casos en que se aplican pruebas no paramétricas, se calcula la significación exacta de las mismas, en lugar de la clásica significación asintótica para reducir la posible influencia del carácter reducido de las muestras.

La segunda parte de este procesamiento enfoca además el criterio de comparación de poblaciones desde el punto de vista de *tests* paramétricos de tipo *Student*, relacionados ya con los valores medios y sus desviaciones estándar. Los resultados paramétricos solo pretenden corroborar aquellos no paramétricos, ahora, con más alto nivel de medición en este mismo diseño de comparación de poblaciones. La razón de utilizar pruebas no paramétricas, en lugar de paramétricas, estriba teóricamente, en que no tenemos formas de probar que los datos se ajustan a la distribución normal, requisito para las pruebas paramétricas.

Cuando se aplican pruebas no paramétricas, no aparecen algunas diferencias que quisie-

ran ser encontradas, pero no significa que tales diferencias no existan, sino que no se tienen suficientes datos para encontrarlas. Esto es válido en particular, en la comparación de la rugosidad alcanzada con el abrasivo de control y el propuesto.

Por último se considera que una comparación arroja resultados diferentes significativamente si la significación del test correspondiente es menor que 0,05. Si resulta incluso menor que 0,01 puede hablarse de diferencias altamente significativas. Si no llega a ser menor que 0,05 pero al menos es menor que 0,10 pueden considerarse medianamente significativas.

Discusión de resultados del procesamiento estadístico

Tal como se planteó en materiales y métodos, el procesamiento estadístico de los resultados se divide en dos partes:

1. Validación general del experimento
2. Comparación de poblaciones (no paramétrico y paramétrico)

Los resultados de la primera parte aparecen en las Tablas 1 a 7. Los de la segunda parte aparecen en las Tablas 8 y 9. A continuación se comentan los resultados de dichas tablas en su orden.

Validación general del experimento

La Tabla 1 resume los resultados de las 36 mediciones de la desviación típica de la distribución de altura o rugosidad de la superficie (RMS) según la ISO 25178 [14].

Se distinguen 18 mediciones con cada abrasivo: el corindón ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) de la firma Buehler y otro producido en el laboratorio ($\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$)

Con cada abrasivo, se ilustran los resultados de los 9 ensayos (probetas “espejo”) y de las 9 mediciones con las probetas “rayadas”. Además, dichas 9 mediciones, se desglosan por los niveles de fraccionamiento de la muestra.

Estos datos sugieren que el abrasivo producido en el laboratorio ($\text{aSiC-}\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) puede provocar similares rugosidades en la superficie de las probetas que el abrasivo patrón usado como control de la firma Buehler ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$).

La Tabla 2 refleja los niveles de rugosidad medidos en las 18 pruebas (espejo) y se confirma,

Tabla 1
Resultados de la RMS (nm) del ensayo

		Al ₂ O ₃		SiC-Al ₂ O ₃				
		Espejo	Rayada	Espejo	Rayada			
Fracción de granos abrasivos (μm)	-45 +38	Probetas	2a	0,487	2,54	6a	0,433	3,21
			2b	0,425	2,47	6b	0,482	3,16
			2c	0,417	2,50	6c	0,491	3,96
	-53 +45	Probetas	3a	0,483	4,23	7a	0,416	4,46
			3b	0,423	4,19	7b	0,457	4,96
			3c	0,485	4,61	7c	0,492	4,78
	-63 +53	Probetas	4a	0,425	6,32	8a	0,481	7,61
			4b	0,451	5,62	8b	0,465	7,82
			4c	0,406	5,75	8c	0,456	8,01
		Al ₂ O ₃		SiC-Al ₂ O ₃				

Tabla 2
Rugosidad medida en probetas espejos
contrastada por niveles de fracción

Rangos según el test <i>Kruskall-Wallis</i>				
	Fracción (μm)		N	Rango medio
Rugosidad en probetas espejo	-45	+38	6	10,25
	-53	+45	6	10,5
	-63	+53	6	7,75
	Total		18	

Sig. exacta del test *Kruskall-Wallis*: 0,635.

que no existen diferencias según el fraccionamiento (significación 0,635 > 0,05), lo que valida que se tienen condiciones de preparación superficial de todas las probetas similares al inicio del experimento.

Por otra parte los resultados mostrados en la Tabla 3 demuestran que si existen diferencias altamente significativas, entre los niveles de fraccionamiento, en los rangos medios de la rugosidad medida en las probetas rayadas (significación 0,000 << 0,01), probando que la concepción

Tabla 3
Rugosidad medida en probetas rayadas
por niveles de fracción

Rangos según el test <i>Kruskall-Wallis</i>				
	Fracción (μm)		N	Rango medio
Rugosidad en probetas rayadas	-45	+38	6	3,50
	-53	+45	6	9,50
	-63	+53	6	15,50
	Total		18	

Sig. exacta del test *Kruskall-Wallis*: 0,000.

general del experimento de desgaste abrasivo es correcto.

Como se esperaba, de acuerdo a los rangos medios, se evidencia que en la medida que se incrementa el nivel de la fracción granulométrica, se incrementa el nivel de rugosidad en la superficie de las probetas.

La Tabla 4 muestra los resultados presentados de la rugosidad medida en probeta espejo, contrastada por abrasivos y se evidencia, que no

Tabla 4
Rugosidad medida en probeta espejo
contrastada
por abrasivos

Rangos según el <i>test Mann-Whitney</i>			
Abrasivo	N	Rango medio	Suma de rangos
Rugosidad Al_2O_3	9	8,00	72,00
Rugosidad SiC- Al_2O_3	9	11,00	99,00
Total	18		

Sig. exacta del *test Mann-Whitney*: 0,248.

existen diferencias significativas en las mediciones iniciales en la probeta espejo entre los dos abrasivos a comparar (significación $0,248 > 0,05$).

Las mediciones originales reflejan que el SiC- Al_2O_3 provoca mayores niveles de rugosidad, pero no son suficientemente significativas para afirmar que la validación general del experimento muestre resultados superiores (Tabla 5), pero se destaca que al menos no son inferiores.

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la comparación del abrasivo SiC- Al_2O_3 respecto al patrón de control Al_2O_3 , en términos de los rangos medios de rugosidad y de acuerdo a las conclusiones anteriores, se clasifican según el nivel de fraccionamiento (fracción granulométrica). Se evidencia que, como tendencia, el abrasivo SiC- Al_2O_3 proporciona rangos medios superiores de rugosidad que llega a ser, al menos medianamente significativos en las fracciones más bajas o altas (significación no menor que 0,05; pero al menos menor o igual a 0,10).

En la Tabla 7, se comparan los resultados obtenidos entre las probetas rayadas y las probetas espejos como si fueran datos independientes. Particularmente en la Tabla 7a, se hace la comparación con las 36 muestras, esto es, considerando ambos abrasivos simultáneamente.

Lógicamente los rangos medios de rugosidad son superiores en las probetas rayadas que en las espejos (significación 0,000).

En la Tabla 7b, se repite este análisis comparativo para cada abrasivo por separado y se reitera, en ambos, que los rangos medios son superiores en el caso de las probetas rayadas, como

Tabla 5
Rugosidad medida en rayada por abrasivos

Rangos según el <i>test Mann-Whitney</i>			
Abrasivo	N	Rango medio	Suma de rangos
Rugosidad Al_2O_3	9	8,11	73,00
Rugosidad SiC- Al_2O_3	9	10,89	98,00
Total	18		

Sig. exacta del *test Mann-Whitney*: 0,297

Tabla 6
Diferencias en los rangos de rugosidad
medidos por uno u otro abrasivo de
acuerdo a los regímenes de fracción

Rangos según el <i>test Mann-Whitney</i>			
a: Caso de la fracción -45 +38 μm			
Abrasivo	N	Rango medio	Suma de rangos
Rugosidad en probetas rayadas Al_2O_3	3	2,00	6,00
Rugosidad en probetas rayadas SiC- Al_2O_3	3	5,00	15,00
Total	6		

Sig. exacta del *test Mann-Whitney*: 0,10

b: Caso de la fracción -53 +45 μm			
Abrasivo	N	Rango medio	Suma de rangos
Rugosidad en probetas rayadas Al_2O_3	3	2,33	7,00
Rugosidad en probetas rayadas SiC- Al_2O_3	3	4,67	14,00
Total	6		

Sig. exacta del *test Mann-Whitney*: 0,2000

b: Caso de la fracción -63 +53 μm			
Abrasivo	N	Rango medio	Suma de rangos
Rugosidad en probetas rayadas Al_2O_3	3	2,00	6,00
Rugosidad en probetas rayadas SiC- Al_2O_3	3	5,00	15,00
Total	6		

Sig. exacta del *test Mann-Whitney*: 0,10.

se podría esperar en cualquier escenario donde se consideren los datos como muestras independientes.

Comparación de poblaciones (no paramétrico y paramétrico)

Los resultados de aplicar el *test* no paramétrico de *Wilcoxon* (test de los signos con rangos

para muestras apareadas), considerando 9 muestras apareadas en cada abrasivo (9 pares de observaciones (espejo-rayada) y de ellas 3 por cada nivel de fracción) se muestran en la Tabla 8.

Puede observarse que en ambos abrasivos, los 9 pares elevan los niveles de rugosidad (del

espejo a la rayada) y por tanto en ambos *tests* se muestran diferencias altamente significativas como era de esperar (significación 0,002). Aquí se reporta la significación unilateral, porque desde el principio se espera que en la probeta rayada se obtengan mayores niveles de rugosidad que en

Tabla 7
Diferencias generales y por abrasivos en los rangos de rugosidad medidos por uno u otro abrasivo de acuerdo a los ensayos (probeta espejo respecto a probeta rayada)

Rangos según el <i>test Mann-Whitney</i>					
a: Caso general para las probetas de ambos abrasivos					
	Ensayos	N	Rango medio	Suma de rangos	
	Probeta espejo	18	9,50	171,00	
Rugosidad	Probeta rayada	18	27,50	495,00	
	Total	36			
Sig. exacta del <i>test Mann-Whitney</i> : 0,000					
b: Análisis para cada uno de los abrasivos por separados					
Abrasivo	Ensayos	N	Rango medio	Suma de rangos	
	Probeta espejo	9	5,00	45,00	
Al ₂ O ₃	Rugosidad	Probeta rayada	9	14,00	126,00
	Total	18			
	Probeta espejo	9	5,00	45,00	
SiC-Al ₂ O ₃	Rugosidad	Probeta rayada	9	14,00	126,00
	Total	18			
Sig. exacta del <i>test Mann-Whitney</i> : 0,000.					

Tabla 8
Comparación apareada (espejo-rayada) utilizando el *test de Wilcoxon*

Rangos según <i>test de Wilcoxon</i>					
Abrasivos			N	Rango medio	Suma de rangos
Al ₂ O ₃	Rugosidad en probeta espejo vs. Rugosidad probeta rayada	Rangos negativos	9 ^a	5,00	45,00
		Rangos negativos	0 ^b	0,00	0,00
		Empates	0 ^c		
		Total	9		
SiC-Al ₂ O ₃	Rugosidad en probeta espejo vs. Rugosidad probeta rayada	Rangos negativos	9 ^a	5,00	45,00
		Rangos negativos	0 ^b	0,00	0,00
		Empates	0 ^c		
		Total	9		
Sig. exacta unilateral de los <i>tests de Wilcoxon</i> para ambos abrasivos: 0,002					

a: Rugosidad en probeta espejo < Rugosidad en probeta rayada. b: Rugosidad en probeta espejo > Rugosidad en probeta rayada. c: Rugosidad en probeta espejo = Rugosidad en probeta rayada.

el espejo, pero en cualquier caso, si no se tuviera en cuenta esta esperanza *a priori*, la significación bilateral de la diferencia sería 0,004, también alta (menor que 0,01).

El enfoque de muestras apareadas y las últimas pruebas reflejadas en la Tabla 7 vienen a complementar el esquema de comparación de poblaciones de un experimento (dos abrasivos: Al_2O_3 y SiC- Al_2O_3 , con dos “momentos de medición”: espejo y rayada, apareadas respecto al nivel de fracción).

Para reforzar la anterior conclusión se aplican pruebas paramétricas con datos continuos originales, que permite cuantificar mejor las diferencias. Los resultados se resumen en la Tabla 9. Particularmente en la Tabla 9a, se muestran las estadísticas descriptivas de tendencia central y variabilidad. Al parecer, las probetas rayadas con el uso de SiC- Al_2O_3 alcanzan valores medios mayores que las mismas probetas usando el abrasivo Al_2O_3 , pero también con una mayor variabilidad.

Tabla 9
Comparaciones verticales y horizontales usando *tests* paramétricos

a: Estadísticas descriptivas						
Estadísticas por abrasivos y tipos de probetas						
	Abrasivos	N	Media	Desv. Est.	Error. Est. de la Media	
Rugosidad en probeta ensayo	Al_2O_3	9	0,445	0,033	0,011	
	SiC- Al_2O_3	9	0,464	0,026	0,009	
Rugosidad en probeta rayada	Al_2O_3	9	4,248	1,487	0,496	
	SiC- Al_2O_3	9	5,330	1,964	0,655	
b: Prueba horizontal entre ambos tipos de probetas con el abrasivo patrón						
<i>Test de Student</i> para muestras apareadas (Al_2O_3)						
Diferencias apareadas						
	Media	Desv. Est.	Error. Est. de la Media	T	gl	Sig. (2-colas)
Rugosidad en probeta rayada vs. Rugosidad en probeta ensayo	3,806	1,493	0,498	7,641	8	0,000
c: Prueba horizontal entre ambos tipos de probetas con el nuevo abrasivo propuesto						
<i>Test de Student</i> para muestras apareadas (SiC- Al_2O_3)						
	Media	Desv. Est.	Error. Est. de la Media	T	gl	Sig. (2-colas)
Rugosidad en probeta rayada vs. Rugosidad en probeta ensayo	3,806	1,493	0,498	7,641	8	0,000
d: Pruebas verticales para cada tipo de probeta comparando abrasivos						
		Test de <i>Levene</i> para igualdad de varianzas		Test de <i>Student</i> para igualdad de las medias		
		F	Sig.	T	gl	Sig. (2-colas)
Rugosidad en probeta ensayo	Test T con igualdad de varianzas	1,467	0,243	-1,366	16	0,191
Rugosidad en probeta rayada	Test T con igualdad de varianzas	1,434	0,248	-1,218	16	0,206

En la Tabla 9b, se comprueba que la diferencia en los resultados de las probetas de ensayo y rayadas, usando el Al_2O_3 , son altamente significativas como se podía esperar. Pero también en caso del $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ son altamente significativas.

En la Tabla 9d, se comprueban las diferencias verticales entre abrasivos para cada uno de los tipos de probeta. Puede observarse que realmente no hay diferencias significativas. Por tanto, se ratifican los resultados obtenidos por métodos no paramétricos y en definitiva se concluye que el nuevo abrasivo puede alcanzar resultados similares a los obtenidos con el patrón.

Conclusiones

Según el esquema propuesto, se obtienen las siguientes conclusiones:

- V1: Comparación vertical inicial (probetas de ensayo entre los 2 abrasivos): no hay diferencias significativas (Tabla 5).
- V2: Comparación vertical final (probetas rayadas entre los 2 abrasivos): no hay diferencias significativas (Tabla 6).
- V3: Comparación horizontal entre probetas de ensayo y rayadas con el abrasivo patrón Al_2O_3 : muestra avances altamente significativos (Tabla 7a).
- V4: Comparación horizontal entre probetas de ensayo y rayadas con el nuevo abrasivo propuesto, $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$: muestra avances igualmente significativos como el anterior (Tabla 7b).

El esquema general de comparación de poblaciones demuestra que no existen razones suficientes para aseverar, que el abrasivo producido en el laboratorio ($\alpha\text{SiC}-\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) mediante proceso SHS-AE produzca resultados muy diferentes al corindón ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) de la firma Buehler empleado como patrón, lo que confirma que sus propiedades abrasivas son al menos comparables, obteniendo similares niveles de rugosidad superficial en las probetas de acero inoxidable 316LVM con la ventaja de menores costos de producción o adquisición.

Agradecimiento

A los compañeros del Centro de Ingeniería de Materiales y Nanotecnología del Instituto Vene-

zolano de Investigaciones Científicas (IVIC), por sus importantes aportes en la realización de este trabajo.

Referencias bibliográficas

1. Johnson, N.L. and F.C. Leone, Statistics and experimental design. 2 ed. Vol. 1. (1977), New York: Wiley.
2. Cochran, W.G., Sampling Techniques. New York: Wiley and Sons, Inc. 1963.
3. Deming, W.E., Some Theory of Sampling. (1950), New York: John Wiley and Sons, Inc.
4. Wilcox, R.R., Introduction to robust estimation and hypothesis testing. (2012): Academic Press.
5. Rosner, B., Fundamentals of biostatistics. (2011): Duxbury Press.
6. Muñoz Carril, P.C. and M. González Sanmamed, Estudio cuantitativo sobre el uso docente de herramientas teleformativas en el ámbito de la programación y bases de datos. Edutec: Revista electrónica de tecnología educativa, No 32 (2010), 3.
7. Freixa, M. and L. Salafranca, Análisis Exploratorio de Datos: Nuevas técnicas estadísticas. Promociones y Publicaciones Universitarias, S.A (PPU, S.A), (1992) 29-42.
8. Canavos, G.C., Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y métodos.: McGraw-Hill. 667, 1988.
9. Díaz, F.R., et al., Bioestadística: Métodos y aplicaciones. 2010.
10. Fay, M.P and M.A. Proschan, Wilcoxon-Mann-Whitney or t-test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules. Statistics surveys, (2010). 4: p. 1.
11. García-Jacomino, J. L., González, G., Quintana-Puchol, R., Villalba, R.y Monsalve, A.: "Obtención y Caracterización del Compuesto Cerámico $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ a Partir de Mineral de Cuarzita y Carbón Vegetal". Acta Microscópica, Vol. 18, No. 1 (2009) 59-66.
12. García-Jacomino, J. L., González, G., Quintana-Puchol, R., Villalba, R.y Monsalve, A.: "Caracterización de la Cerámica Compuesta $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ Obtenida Mediante Proceso

- EA-SHS". Acta Microscópica, Vol. 18, No. C (2009) 243 - 244.
13. ASTM, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. (2007), ASTM International: West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States. p. 1-13.
 14. ISO, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal -. (2010), International Organization for Standardization: Switzerland.
 15. Pallant, J., SPSS survival manual: A step by step guide to data analysis using SPSS. (2010): Open University Press.
 16. Grau Ábalo, R., C. Valdés Correa, and M. Rojas Betancur, Metodología de la Investigación. 2 ed. (2004), Ibagué, Colombia: El Poirá S.A.

Recibido el 15 de Septiembre de 2014

En forma revisada el 6 de Octubre de 2014