

CARACTERIZACION DE LA TEXTURA SUPERFICIAL GENERADA EN PAREDES DE CILINDROS HIDRAULICOS POR BRUÑIDO

RESUMEN

Este documento proporciona una visión de las metodologías y parámetros usados en la caracterización de texturas superficiales en 2D y 3D, obtenidas por bruñido (honing y plateau-honing), como un primer paso para el modelado del proceso de mecanizado y el comportamiento funcional de la pared interna del cilindro hidráulico. Un estudio comparativo entre parámetros 2D y 3D ha sido realizado para establecer la posible correlación entre estos. Para reducir el número de experimentos, un estudio preliminar ha sido hecho sobre 18 muestras de cilindros con diferentes herramientas de bruñir.

PALABRAS CLAVES: Bruñido – honing y plateau-honing – Rugosidad superficial, Caracterización superficial.

ABSTRACT

This document provides an overview of the methodologies and parameters used for 2D and 3D characterisation of honed and plateau-honed surfaces as a first step for modelling machining processes and functional behaviour of hydraulic cylinders internal surface. A comparative study has been made between 2D and 3D parameters. To reduce the experimental number, a preliminary study of correlation between them has been made over 18 honed cylinders samples with different honing tools.

KEYWORDS: Plateau-honing, Honing, Surface Roughness, Surface Characterization.

1. INTRODUCCIÓN

El bruñido (en inglés honing), es un proceso de acabado en mecanizado que usa piedras abrasivas como medio de corte. Estas piedras están simultáneamente desarrollando un movimiento de rotación un movimiento lineal alternativo y ejerciendo una fuerza contra la superficie de trabajo, normalmente cilíndrica (fig. 1).

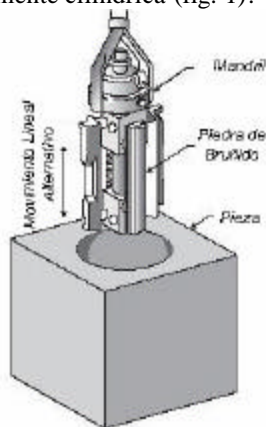


Figura 1. Operación de Bruñido

El bruñido es usado en una amplia variedad de aplicaciones que incluye paredes de cilindros de motor, compresores, válvulas, cilindros hidráulicos, alojamientos de cojinetes. La topografía superficial generada por el bruñido, tiene un profundo efecto sobre el comportamiento tribológico del sistema.

Fecha de Recepción: 31 Enero de 2006
Fecha de Aceptación: 12 Junio de 2006

MILTON COBA SALCEDO

Ingeniero Mecánico,
Universidad del Atlántico
Estudiante de Doctorado
Universidad Politécnica de Cataluña
milton.fabian.coba@upc.edu

Hay básicamente dos razones para realizar el bruñido; mejorar la geometría de una superficie cilíndrica, y/o alterar o modificar la topografía superficial. Estos errores son generalmente causados por; el propio proceso de mecanizado, el porta-herramientas o un tratamiento térmico. El bruñido puede remover estos errores y puede hacerlo con la menor tasa de remoción de material posible.

En cuanto a modificar la topografía superficial, esta es una característica única del bruñido. Generalmente dirigida a mejorar las características tribológicas y de desgaste del sistema.

Con el bruñido, el acabado superficial de una pieza puede ser controlado con precisión, debido a la baja velocidad de corte, y la presión de expansión ajustable de las piedras de bruñir. Adicionalmente, la integridad de la superficie del metal después del bruñido es excelente, mientras que otros procesos de mecanizado como el rectificado o el taladrado, pueden causar daños en la subcapa de la pieza.

2. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DE LA TEXTURA SUPERFICIAL DE LA PAREDES DE CILINDROS.

La topografía superficial de las paredes de los cilindros, tienen un efecto significativo en las condiciones de contacto deslizante entre émbolo y cilindro.

En el año 1982 Santochi y Vignale [1], hicieron un estudio sobre las superficies y sus características funcionales para los motores de combustión de dos tiempos. Establecieron como necesidades funcionales:

- *Alta capacidad de contacto*
- *Resistencia al desgaste*
- *Reducción de la fricción*

El experimento consistió básicamente en realizar dos operaciones de bruñido, una a la que llamaron bruñido rugoso y otra a la que llamaron bruñido fino. Con el bruñido rugoso se obtiene los valles y con el bruñido fino se rebajan los picos del bruñido rugoso obteniendo meseta planas con rugosidad fina. La superficie obtenida fue denominada “plateau-honing” (fig. 2).

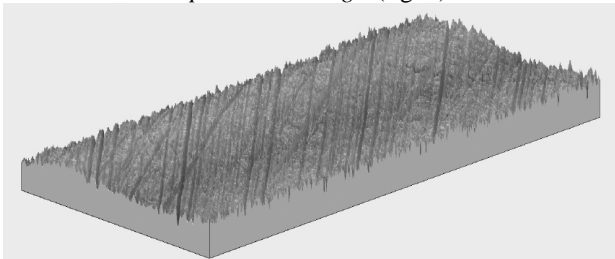


Figura 2. Superficie 3D tipo plateau-honing.

El “plateau-honing” es una textura superficial generada, en la que encontramos los beneficios de una superficie suave o fina y los beneficios de una superficie rugosa. Es decir, las características funcionales de:

- *Mesetas planas*; para disminuir la fricción.
- *Mayor área de contacto*; para disminuir el desgaste y mejorar el trabajo de los anillos.
- *Incremento del volumen de los valles*; para mejorar la lubricación por la retención y el volumen del lubricante.
- *Textura de valles cruzado*; que facilitan la circulación del aceite.

El bruñido tipo *plateau-honing* se posiciona entonces como un importante proceso tecnológico para obtener superficies con características deslizantes.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN 2D OBTENIDA POR BRUÑIDO.

Parámetros de textura superficial como R_a , R_z , RMS , t_p , descritos en normas internacionales [2-3], se utilizan en la caracterización de la textura superficial en casi todas las aplicaciones de rugosidad. La utilización de estos parámetros en el análisis de superficies obtenidas por múltiples procesos como el *plateau-honing*, no describe adecuadamente las características de la textura superficial, porque no proporciona información separada de cada uno de los procesos que se han usado para la obtención de la superficie.

Una técnica corriente para el análisis de superficies tipo *honing* y *plateau-honing* se hace sobre la curva conocida como *curva de porcentaje de material Abbott-Firestone* (fig. 3). Esta técnica se encuentra descrita en la norma ISO 13565-2 [4].

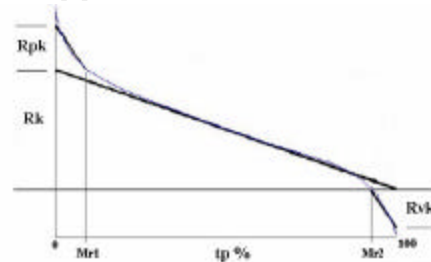


Figura 3. Parámetros de la Curva Abbot-Firestone.

El principal inconveniente que presenta esta curva para el análisis de superficies tipo *plateau-honing* es que no separa, o no se visualizan claramente las características de las dos superficies generadas con los dos procesos, el bruñido rugoso y el fino, lo que hace difícil un procedimiento de análisis fiable.

Dado que el bruñido es un proceso de naturaleza aleatoria, un modelo gaussiano sería apropiado para describir la textura de la superficie.

La distribución acumulada de esa señal gaussiana, general una curva en forma de ‘s’, esta curva establece los parámetros que describen el aumento del porcentaje de material, en función del nivel de profundidad del perfil de rugosidad. Esta curva de distribución acumulada también se puede graficar, como función de probabilidad de la desviación estándar, la cual tiene forma de una línea recta (fig. 4).

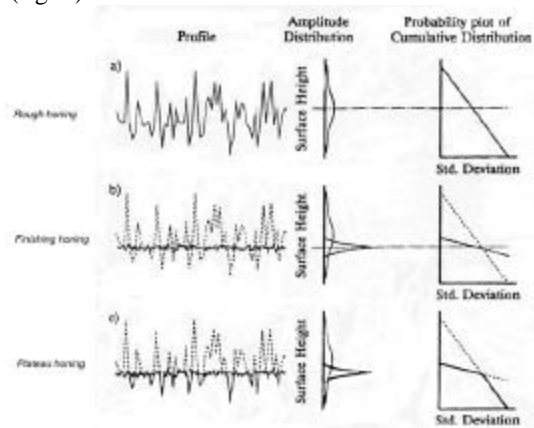


Figura 4. Combinación de los procesos [5].

Whitehouse sugirió este método [5], de graficar la función gaussiana como distribución acumulada de probabilidad, que al superponer las dos curvas de distribuciones de las funciones gaussianas de los dos procesos, nos mostrara dos líneas rectas con la distribución acumulada de cada proceso por separado (fig. 5).

El gráfico de probabilidad representa una estimación de la rugosidad, la pendiente de cada línea (R_{pq} , R_{mq} y R_{vq}), determina el valor de R_q de el proceso correspondiente – bruñido rugoso y operación de *plateau* o bruñido fino, en el caso del *plateau-honing* (fig. 5).

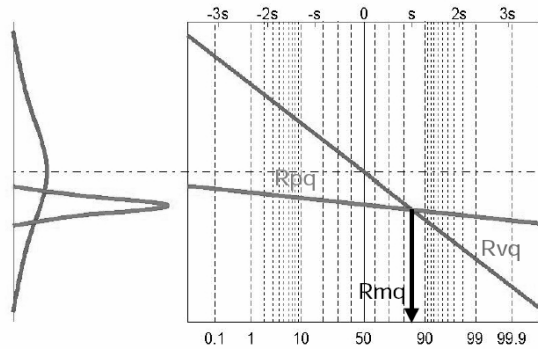


Figura 5. Parámetros de la curva de probabilidad de material.

La norma ISO 13565-3:1998 [6], define estos parámetros;

- R_{pq} , pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona plana (meseta).
- R_{vq} , pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona de valles.
- R_{mp} , porcentaje relativo de material en la zona de intersección meseta-valles.

La aproximación gaussiana proporciona una indicación directa de las variaciones de estado superficial. Los tres parámetros de probabilidad representan, de forma independiente, las tres componentes del proceso de *plateau-honing*. Esto permite monitorizar directamente las variaciones del proceso.

Sin embargo, la aplicación de esta técnica descrita en la norma internacional ISO 13565-3:1998 [6], y sus parámetros allí descritos, aún no se ha introducido completamente en la industria, pero se ha estado aplicando a nivel académico. A nivel industrial siguen siendo muy utilizados los parámetros R_a , R_t , t_p . En Alemania son muy utilizados los parámetros de la curva de Abbot R_k , R_{pk} , R_{vk} , y en Estados Unidos se están utilizando los parámetros de la curva de probabilidad R_{mq} , R_{pq} , R_{vq} .

4. CARACTERIZACION DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN 3D OBTENIDA POR BRUÑIDO.

La definición de parámetros capaces de caracterizar y cuantificar la micro-geometría de la superficie ha sido un tópico de gran interés en las últimas décadas. La disponibilidad de datos 3D que permiten las nuevas generaciones de instrumentos de medición, han estimulado a los investigadores en muchos campos.

Impresionantes alcances se ha conseguido en las técnicas de visualización y manipulación de imágenes capaces de proporcionar representaciones realistas de las superficies. En el presente, la caracterización de superficies en 3D no cuenta con una norma internacional al respecto, pero este tema es objeto de investigación.

Se espera conseguir una norma en esta área a través del proyecto denominado *The Development of a Basis for 3-D Surface Roughness Standards* [7], encargado por la ISO y financiado por la UE. Actualmente, se prepara una propuesta de norma encargado por la ISO y el comité técnico 213, sobre todos los aspectos para la caracterización de la rugosidad superficial en 3D.

Varios parámetros de rugosidad superficial en 3D son equivalentes de los parámetros de dos dimensiones, una breve comparación de estos la podemos ver en la siguiente figura (fig. 6).

	Parámetros 3D	Parámetros 2D
Parámetros de Amplitud	Root mean square deviation Sq	Root mean square roughness Rq
	Skewness Ssk	Skewness Rsk
	Kurtosis Sku	Kurtosis Rku
	Maximum peak height Sp	Maximum peak height Rp
	Maximum valley height Sv	Maximum valley height Rv
Parámetros de Espaciado	Maximum height of texture surface Sz	Maximum height of the profile Rt o Rmax
	Density of summits Sds	High spot count HSC
	Fastest decay auto-correlation Length Sal	
Parámetros Híbridos	Texture aspect ratio Str	Mean radius of asperities r_p
	Arithmetic mean peak curvature Ssc	Mean slope of the profile Δa
	Root mean square slope of the Assessed texture surface Sdq	RMS slope of the profile Δq
Parámetros Fractales	Developed interfacial area Ratio Sdr	
	Fractal dimension Sfd	Fractal dimension D
Otros Parámetros	Texture direction of the texture Surface Std	
	Ten point height of surface Ssz	Ten point height Rz
Parámetros de la Curva de Material	Core roughness depth Sk, Spk	Core roughness depth Rk
	Material portion Svk	
	Reduced peak height/valley depth SMr1, SMr2	Reduce peak valley/peak height Rvk, Rpk
Volumen Vacío	Core void volume of the texture surface Vvc	
	Valley void volume of the Texture surface Vvv	
Volumen de Material	Material volume of the texture surface Vmp	
	Core material volume of the Texture surface Vmc	

Figura 6. Equivalencia de parámetros en 2D y 3D.

5. TRABAJO EXPERIMENTAL.

Se han mecanizado por bruñido 18 probetas de cilindros (fig. 7), en tres grupos en función del nivel de calidad superficial que se desea para distintos tipos de requerimientos funcionales, a saber, cilindros de prestaciones altas, medias y bajas.

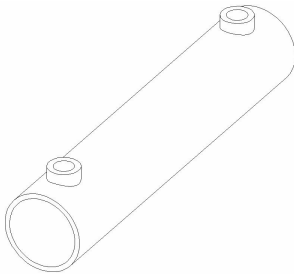


Figura 7. Cilindro Probeta usado para los experimentos

- **Material:** ST-52
- **Dimensiones Totales:** Ø 60 x 607
- **Condiciones Iniciales:** Tubo Soldado
- **Maquina:** Honingtec n482
- **Proceso:**
 - 6 Cilindros en Desbaste
 - 6 Cilindros en Desbaste y Semi-Acabado
 - 6 Cilindros en Desbaste Semi-Acabado y Acabado

En cuanto a las condiciones del proceso cada operación ha tenido una velocidad de rotación de la herramienta distinta, se utilizo la misma velocidad axial en los tres procesos, la presión de la piedra contra la pared del cilindro ha sido la misma para tres operaciones, así como, el líquido refrigerante utilizado. Se han utilizado tres tipos distintos de piedras abrasivas, grano grueso para desbaste, grano medio para semi-acabado y grano fino para acabado, esto permitió observar como variaba la rugosidad según que tipo abrasivo que se utilizaba.

Se han realizado mediciones del acabado superficial del cilindro en tres posiciones, en los extremos (5cm del extremo del tubo) y en medio, para garantizar la repetitividad de los valores medidos. Además en cada posición se han repetido la medición en tres orientaciones a 120°. Esto con el fin de controlar las posibles variaciones producto de la dinámica de la herramienta de bruñir (figs. 8-9).

	DESABASTE			DESABASTE + SEMI-ACABADO			DESABASTE+SEMI-ACABADO+ACABADO		
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
Sa	3,428	0,268	3,308	0,249	3,430	0,345	1,802	0,189	
Sq	4,984	0,380	4,235	0,371	4,414	0,508	2,457	0,259	
Sp	20,000	2,893	23,529	5,993	24,740	6,100	13,653	4,343	
Sv	14,100	1,955	14,727	4,194	14,260	2,431	9,569	2,304	
St	34,094	3,533	38,256	6,181	38,995	7,085	23,445	5,788	
Ssk	-0,004	0,270	3,951	0,637	3,859	0,546	3,757	0,578	
Sku	3,405	0,270	3,951	0,637	3,859	0,546	3,757	0,578	
Sz	32,236	2,743	33,683	4,721	35,750	6,005	20,437	3,070	
Sds	905,85	92,255	815,41	6,151	880,195	48,251	708,111	135,038	
Sdf	0,0059	0,0011	0,0061	0,0011	0,0065	0,0009	0,0041	0,0038	
Sk	6,625	0,879	9,527	0,916	9,798	1,118	5,423	0,660	
Svk	6,951	0,712	6,868	1,074	4,844	1,341	2,464	0,417	
Skl	4,283	1,246	4,202	0,995	4,087	1,199	2,581	0,755	
Sbl	0,264	0,073	0,278	0,075	0,272	0,076	0,285	0,078	
Sbz	1,024	0,112	1,546	0,077	1,593	0,071	1,508	0,084	
Sbv	0,123	0,021	0,114	0,013	0,116	0,017	0,125	0,016	

Figura 8. Valores de Rugosidad en 3D Medidos.

	DESABASTE			DESABASTE + SEMI-ACABADO			DESABASTE+SEMI-ACABADO+ACABADO		
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	
Ra	3,071	0,395	3,056	0,207	3,208	0,426	1,802	0,224	
Rq	3,889	0,442	3,903	0,409	4,138	0,660	2,445	0,289	
Rp	12,041	2,222	12,858	2,864	14,145	3,495	8,408	1,468	
Rv	10,815	1,983	9,961	1,864	10,587	2,384	6,803	1,049	
Rt	23,855	2,663	22,819	3,700	24,269	5,680	15,042	1,991	
Rsk	0,079	0,322	0,248	0,294	0,307	0,325	0,163	0,274	
Rku	3,283	0,486	3,368	0,449	3,525	0,720	3,521	0,462	
Rz	18,708	1,952	17,488	2,292	18,944	2,964	11,691	1,473	
Rds	27,38	4,09	28,33	3,01	31,67	4,95	37,72	8,53	
Rdf	0,104	0,042	0,071	0,010	0,061	0,014	0,062	0,010	
Rsk	0,104	0,042	0,071	0,010	0,061	0,014	0,062	0,010	
Rvk	4,218	0,880	4,516	0,855	5,349	1,926	2,991	0,695	
Rbl	4,181	1,382	3,786	1,206	3,796	1,440	2,537	0,676	

Figura 9. Valores de Rugosidad en 2D Medidos

6. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO.

Para tener una primera idea de cómo se comportan los parámetros de rugosidad en 2D y 3D, hemos graficado los valores de rugosidad medidos para cada parámetro como podemos observar en la figura 10, cada punto representa una medición hecha en el cilindro, como en cada cilindro se han tomado tres mediciones, tendremos 18 mediciones para cada proceso.

En la comparación entre parámetros 2D y 3D se realizó el estudio por grupos, observando como los parámetros de amplitud 2D y 3D, cuyo cálculo se base en línea central el comportamiento de los parámetros es casi igual en 2D como en 3D.

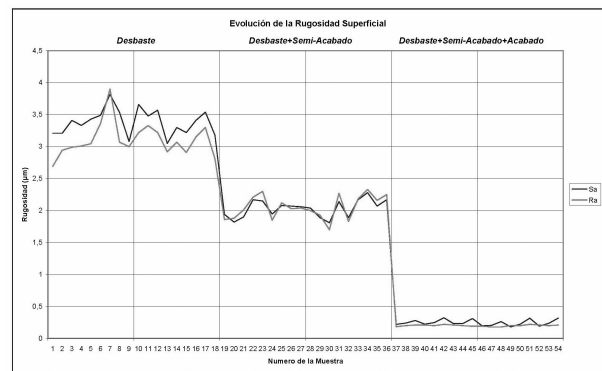


Figura 10. Comparación entre Parámetros de Amplitud. (Ra vs Sa).

En caso de parámetros de amplitud para valores extremos, es decir aquellos que nos proporcionan información acerca del número de picos o valles, altura total, etc. Aunque el comportamiento es similar la dispersión en los datos es mayor, ver figura 11.

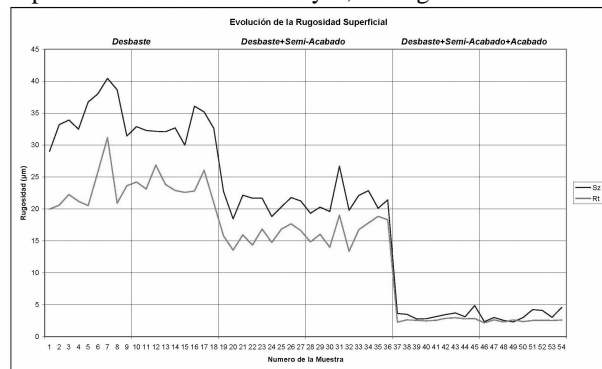


Figura 11. Comparación entre Parámetros de Extremo. (Rt vs Sz).

En cuanto a los parámetros de espaciado, el comportamiento de los parámetros en 2D y 3D es bastante diferente, como se observa en la figura 12.

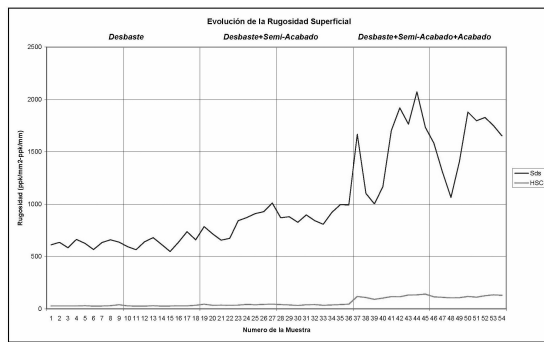


Figura 12. Comparación entre Parámetros de Espaciado. (HSC vs Sds).

Los parámetros de curva de abott también mostraron un comportamiento similar tanto en 2D como en 3D, aunque con una notable dispersión en los datos, ver figura 13.

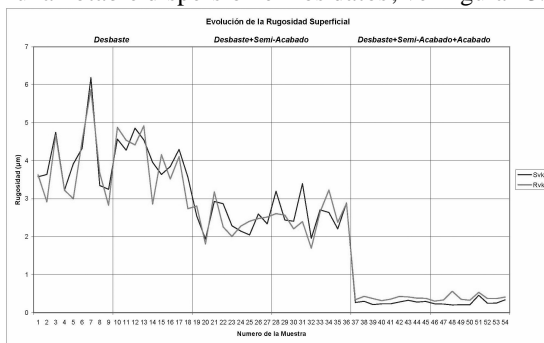


Figura 13. Comparación entre Parámetros de la Curva de Abbott. (Rvk vs SvK).

7. ANALISIS DE LA CORRELACION.

Un análisis más riguroso, hecho a través del análisis de regresión entre parámetros 2D y 3D nos muestra el nivel de correlación entre parámetros similares.

Como se observo en la figura 10, la correlación entre parámetros de rugosidad 2D y 3D de promedio (Ra, Sa, Rq, Sq), es bastante buena. Esto se refleja nuevamente en la figura 14.

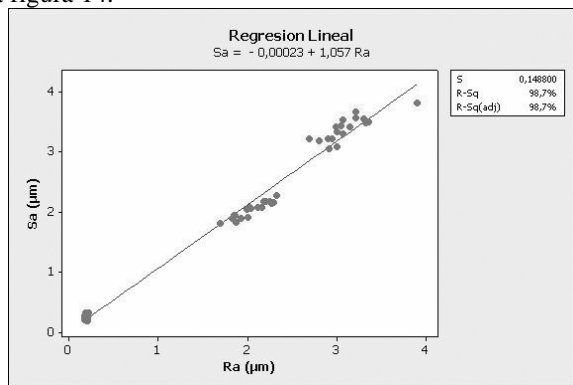


Figura 14. Correlación entre Parámetros de Amplitud. (Ra vs Sa).

Para el caso de los parámetros de extremo, notamos la dispersión de los datos (fig. 15), aunque cabe anotar que para los valores de acabado (los valores mas pequeños de

rugosidad) la correlación sería bastante buena, esto se explica porque en el acabado la mayoría de los picos altos y valles profundos han sido removidos por el proceso de mecanizado.

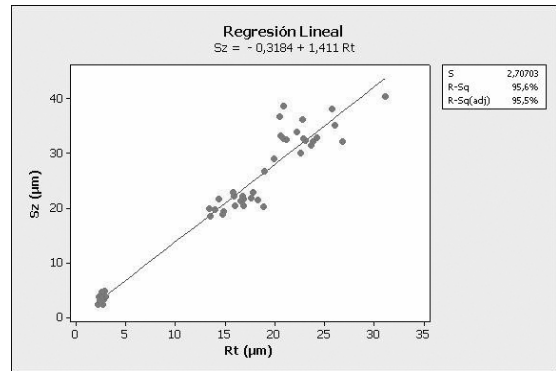


Figura 15. Correlación entre Parámetros de Extremo. (Rt vs Sz).

Como podemos observar en la fig. 16 existe una pobre correlación entre parámetros espaciales, esto se entiende, ya que son especialmente sensibles a la frecuencia de onda de corte, en superficies 3D el proceso de filtrado de señal no se realiza de la misma forma que en perfiles 2D.

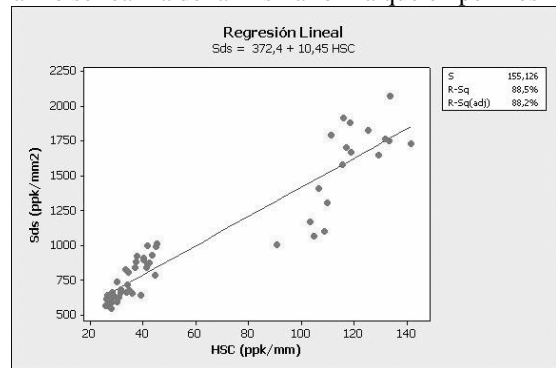


Figura 16. Correlación entre Parámetros de Espaciado. (HSC vs Sds).

En cuanto a los parámetros de la curva de Abbott, podemos observar que los valores de desbaste y semi-acabado tienen gran dispersión, pero en el acabado los valores alcanzan a ser similares, lo cual indica que para el acabado nos puede proporcionar información útil acerca del proceso (fig. 17).

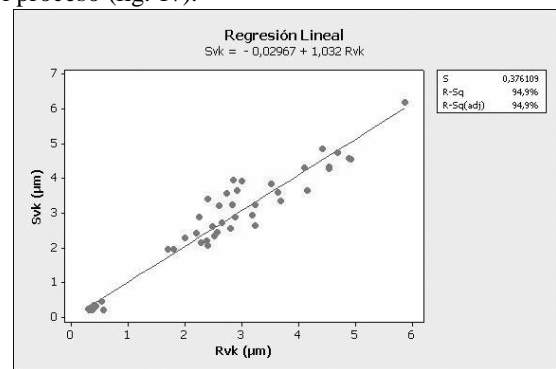


Figura 17. Correlación entre Parámetros de la Curva de Contacto. (Rvk vs SvK).

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hemos expuesto como la utilización de los parámetros de la curva de Abbott-Firestone – Rk, Rvk, Rpk - es conveniente para la caracterización de superficies generadas por bruñido tipo honing, pero no es adecuada para la caracterización de superficies tipo plateau-honing, ya que esta es una textura superficial obtenida por múltiples procesos – a saber dos, un bruñido rugoso y un bruñido fino -.

Los parámetros de curva de probabilidad – Rpq, Rvq, Rmq - representan claramente las características de cada proceso. Esto permite controlar de forma independiente, las tres componentes del *plateau-honing*. “*Cuando un parámetro excede los límites de control marcados, el ingeniero de fabricación puede actuar directamente sobre la componente del proceso de fabricación involucrada*”. Además, la independencia lineal permite estudiar y verificar estadísticamente las componentes del proceso de fabricación, sin interacciones matemáticas entre los parámetros.

En cuanto a la caracterización en tres dimensiones, existen diversas dificultades para el trabajo en esta área. Principalmente por dos razones; aun no hay un desarrollo suficientemente eficaz de los instrumentos de medición pues los instrumentos de contacto consumen un tiempo extremadamente alto en la captación de la superficie, y los instrumentos ópticos tienen aun problemas que hacen poco fiable su uso industrial

La otra tiene que ver con que aun no existe una norma internacional que proporcione los lineamientos para caracterizar superficies en tres dimensiones. Existen diversos trabajos, así como, una propuesta de norma que utilizamos como guía para realizar este trabajo.

De este trabajo experimental podemos concluir que si bien el estudio de las características superficiales debería realizarse en tres dimensiones ya las superficies son realmente tridimensionales, ante las dificultades señaladas anteriormente, encontramos que la información que podemos obtener en dos dimensiones es en algunos casos similar como lo vemos en el análisis de la correlación y el comportamiento de los parámetros de rugosidad en distintos procesos, a la información en tres dimensiones.

Por ello los parámetros de rugosidad en dos dimensiones nos proporcionan suficiente información para determinar condiciones funcionales de las superficies, caso particular, la pared de los cilindros hidráulicos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] SANTOCHI, M., VIGNALE, M., A study on the functional properties of a honed surface, Annals of CIRP 31/1 (1982) p. 431-434.
- [2] ISO 4287:1997, Especificación Geométrica de Productos (GPS), Calidad Superficial: Método del Perfil; términos, definiciones y parámetros del estado superficial.
- [3] ASME B46.1, Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay), 1995.
- [4] ISO 13565-2:1996, Especificación Geométrica de Productos (GPS), Calidad Superficial: Método del Perfil; Superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad, Parte 2: Caracterización de las alturas mediante la curva de porcentaje de materia (Curva de Abbott-Firestone).
- [5] WHITEHOUSE D.J., Assessment of Surface Finish Profiles Produced by Multi-Process Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs. 199/B4 1985
- [6] ISO 13565-3:1998, Especificación Geométrica de Productos (GPS), Calidad Superficial: Método del Perfil; Superficies con propiedades funcionales distintas, según el nivel de profundidad, Parte 3: Caracterización de las alturas mediante la curva de probabilidad del material.
- [7] BLUNT L., et al, The Development of a Basis for 3-D Surface Roughness Standards, European Project No SMT4-CT98-2209, Final Report, 2001.