

Rugosidad Superficial

Introducción

El constante progreso en el área industrial exige métodos cada vez más eficientes para la obtención de productos cada vez más sofisticados. El diseño de nuevos mecanismos exige una perfección creciente y las tolerancias de fabricación se hacen cada día menores, tanto que las formas anteriormente aceptadas debido a su método de obtención a través de máquinas-herramientas, ya no podrán ser más aplicadas sin previa verificación de su geometría y textura superficial.

Superficies reales, por más perfectas que sean, presentan particularidades que son una marca del método empleado para su obtención, por ejemplo: torneado, fresado, rectificado, bruñido, lapidado, etc. Las superficies así producidas se presentan como conjunto de irregularidades, espaciamiento regular o irregular y que tienden a formar un patrón ó textura característica en su extensión. En esta textura superficial se distinguen dos componentes distintos: rugosidad y ondulación.

La rugosidad ó textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. Los espacios entre crestas varían entre 4 y 50 veces la profundidad de la depresión.

La ondulación o textura secundaria es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales de forja o fundición, etc.

Los espaciamientos entre las ondas (compresiones de ondulación) pueden ser de 100 a 1000 veces su amplitud.

- 1- Extensión de rugosidad.
- 2- Extensión de ondulación.
- 3- Orientación de los surcos.
- 4- Amplitud de ondulación.
- 5- Amplitud de rugosidad (Altura pico-valle).

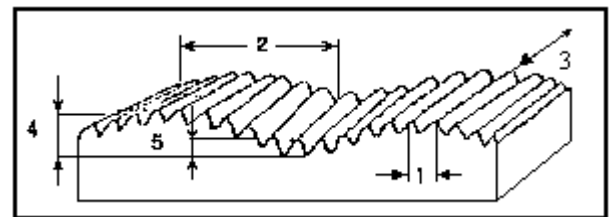


Figura 1

Como se observa en la Figura 1, una superficie presenta errores de diferentes magnitudes y su definición es posible a través de medios o técnicas también diferentes, por eso, para facilitar su estudio, se dividen en dos grandes grupos: errores macrogeométricos y errores microgeométricos.

Errores macrogeométricos

Llamados también errores de forma o de textura secundaria y que incluyen entre ellos divergencias de ondulación, ovalización, multifacetamiento, conicidad, cilindricidad, planedad, etc., y son posibles de medición a través de instrumentos convencionales como micrómetros, comparadores, proyectores de perfiles, etc.

Errores microgeométricos

Conocidos como errores de rugosidad o de textura primaria. Su perfil está formado por surcos, huellas o marcas dejadas por los procesos de mecanizado durante la fabricación. Su medición solamente es posible debido al progreso en la electrónica que con auxilio de circuitos electrónicos desarrollaron aparatos basados en sistemas que utilizan una pequeña aguja de punta muy aguda para recorrer una muestra de la superficie y definir numérica o gráficamente su perfil.

Para estudiar y crear sistemas de evaluación del estado de las superficies se hace necesario definir previamente diversos conceptos que permiten crear un lenguaje apropiado, así tenemos:

- Superficie ideal
- Perfil ideal
- Superficie real
- Perfil real
- Perfil efectivo
- Perfil de rugosidad

Los que analizaremos a continuación:

Superficie ideal

Es la superficie ideal, por definición sin errores, perfecta. Ejemplo: superficie plana (figura 2), cilíndrica, etc.

Perfil Ideal

Perfil resultante del corte de una superficie ideal por un plano perpendicular (figura 3). En algunas normas esta característica es denominada perfil nominal, y es el perfil ideal, por definición sin errores.

Superficie Real

Es la superficie que limita al cuerpo y la separa del medio ambiente (figura 4).

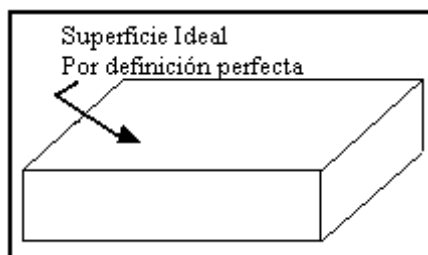


Figura 2

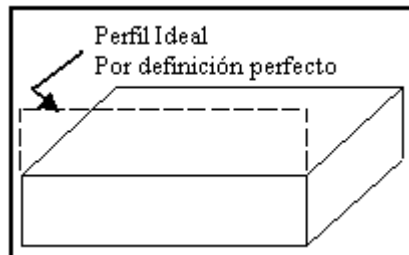


Figura 3

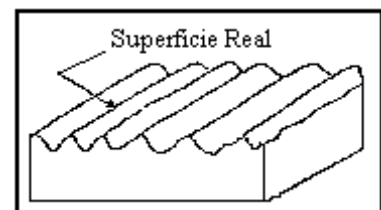


Figura 4

Perfil Real: Es el perfil resultante de cortar una superficie real por un plano definido en relación a la superficie ideal. Limita la sección material y la separa del medio ambiente, incluida la ondulación (fig. 5).

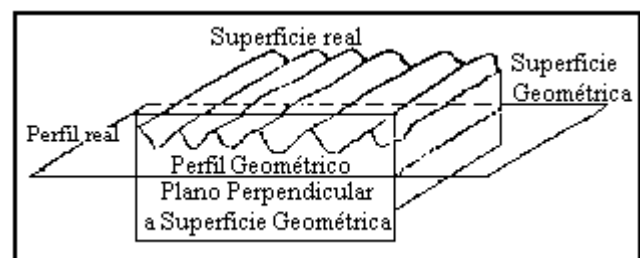


Figura 5

Perfil Efectivo: Imagen aproximada de un perfil real obtenido por un medio de evaluación ó medición.

El perfil efectivo es función de las características geométricas y físicas del instrumento de medición y de la técnica utilizada para su evaluación. No es filtrado y su diferencia con el perfil real es una cierta deformación causada por la imprecisión del aparato.

Perfil de rugosidad: Se obtiene a partir del perfil efectivo por un instrumento de evaluación con sistema de filtrado (filtrado de ondas) para excluir otras irregularidades (ondulación, por ejemplo).

De acuerdo a las definiciones presentadas, se concluye que el perfil de rugosidad está superpuesto al perfil de ondulación, de allí la necesidad de contar con un sistema que permita excluir a este último para una

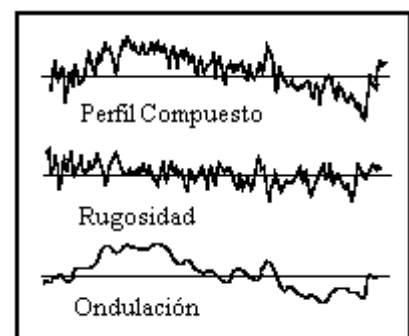


Figura 6

medición de influencias indeseadas (figura 6).

Importancia del acabado superficial

El interés que despierta la obtención de buenas características del acabado superficial está fundamentado en que las mismas influyen en la prestación de las superficies, atento a que suelen tener que responder a una múltiple gama de solicitudes, entre ellas las siguientes:

- Especularidad
- Precisión de tolerancia
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la fatiga
- Pasaje de fluidos

Susceptibles de ser optimizadas a partir de sistemas de evaluación de acabado superficial.

Aspecto económico:

El acabado superficial de un componente mecánico debe tener en cuenta no solamente el aspecto estético como una función específica, sino que también debe ser producido al menor costo posible, considerando que existe una relación directa entre el grado de acabado y el tiempo necesario para lograrlo, como muestra el gráfico de la Figura 7.

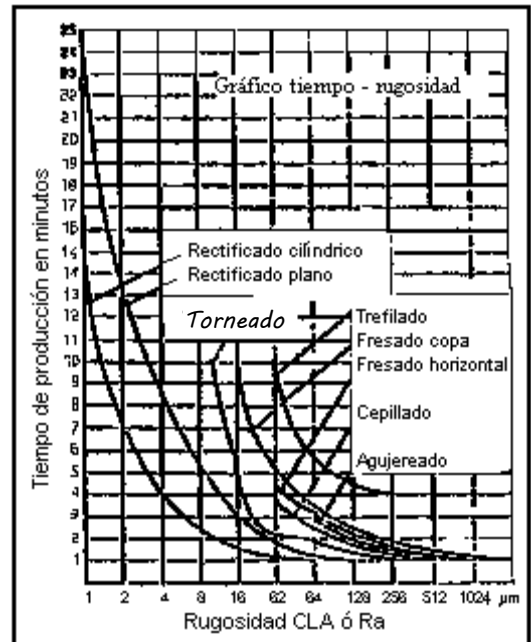


Figura 7

Influencia de la capacidad relativa de carga: En el estudio de dos marcas de motores de combustión interna se observa que la rugosidad, tanto de los metales de biela como de los muñones de cigüeñal, debe ser tanto menor cuanto mayores sean las condiciones de carga.

En la Figura 8 podemos observar como varía con la rugosidad superficial, la capacidad de carga de un metal: la máxima capacidad de carga es obtenida con una mejoría del 100% en relación a una superficie simplemente rectificada.

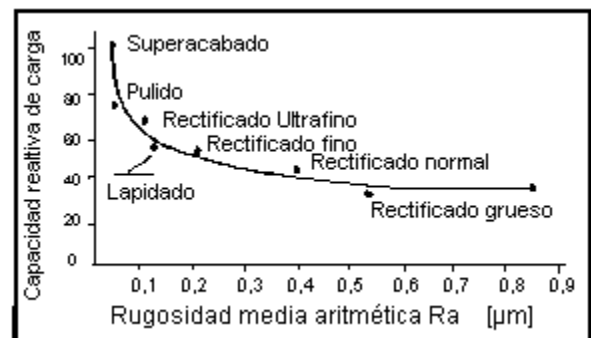


Figura 8

Efecto de la rugosidad en la lubricación:

La efectividad de una película de aceite en la lubricación de dos piezas en movimiento será nula si su espesor es menor que la profundidad de la rugosidad, ya que eso significa que habrá contacto de metal con metal, pudiendo influir no solamente en su altura como también en su forma, como muestra la figura 9.

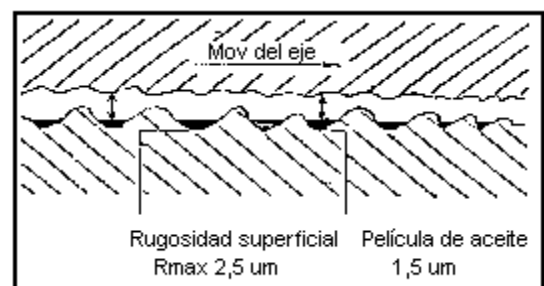


Figura 9

Influencia en la transmisión de calor:

La influencia de la rugosidad superficial también puede notarse en la transmisión del calor entre dos superficies, donde se observa que a medida que la rugosidad disminuye, el coeficiente de transmisión de calor aumenta, debido a que es mayor el área de contacto.

Sistemas de medición de la rugosidad

La definición de medición de textura superficial se realiza en forma geométrica, ante la imposibilidad de una definición funcional. Las definiciones geométricas son bastante abstractas porque están basadas en una línea de referencia que existe solamente en teoría. Los resultados incluso sufren ciertas distorsiones por la utilización de filtros para excluir la ondulación cuando se pretende definir la rugosidad.

Fueron desarrollados dos sistemas de referencia: El sistema “E” o de la envolvente y el sistema “M” o de la línea media.

Sistema “E” o de la envolvente (Figura 10)

Este sistema tiene por base las líneas envolventes descritas por los centros de dos círculos, uno de radio R (normalmente 250 mm) y otro de radio r (normalmente 25 mm) respectivamente, que ruedan sobre el perfil efectivo.

Las líneas AA y CC así generadas, son colocadas paralelamente a sí mismas en dirección perpendicular al perfil geométrico, tocando el perfil efectivo y generando las posiciones BB y DD. La rugosidad es definida como el error del perfil efectivo en relación a la línea DD. La ondulación está indicada como el error de la línea DD en relación a línea BB.

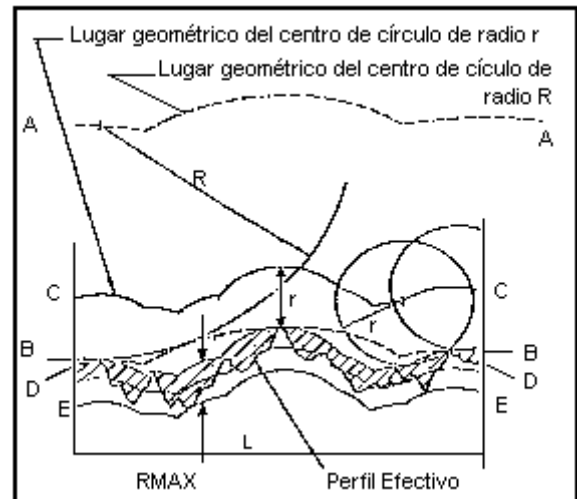


Figura 10.

Finalmente el error de la línea BB en relación al perfil geométrico y considerado como error de forma.

La línea envolvente puede ser colocada de manera de obtener la igualdad de áreas del perfil situadas por encima y por debajo de ellas. Obteniéndose una línea correspondiente a la línea media del sistema M, a partir de la que pueden ser calculados los parámetros R_a y R_q (definidos mas adelante). De manera semejante, desplazando la línea envolvente hasta tocar el punto más bajo del perfil se obtiene la línea EE que permite la medición del parámetro $R_{máx}$ (definido mas adelante).

Por este método, la línea de referencia es obtenida a través de la envolvente del círculo y su mayor dificultad reside en la definición del perfil geométrico, que debe ser ampliado por igual en ambas direcciones, consecuentemente la cantidad de papel gráfico que se requiere es considerable.

Sistema “M” o de la línea media

Dentro de la metrología de superficies no se mide la dimensión de un cuerpo (eso corresponde a la metrología dimensional) pero sí los desvíos en relación a una forma ideal (forma perfectamente plana, por ejemplo). De esta manera, tenemos que usar como línea de referencia una forma ideal (o una forma próxima a ésta, como ocurre en la práctica). Figura 11.

En el sistema M, la línea de referencia utilizada es la **Línea Media**, que se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, con la misma forma que el perfil geométrico, dispuesta paralela a la dirección general del perfil, dentro de los límites comprendidos como base de medición, de modo que la suma de las áreas por encima de ella sean exactamente iguales a la suma de las áreas que están por debajo.

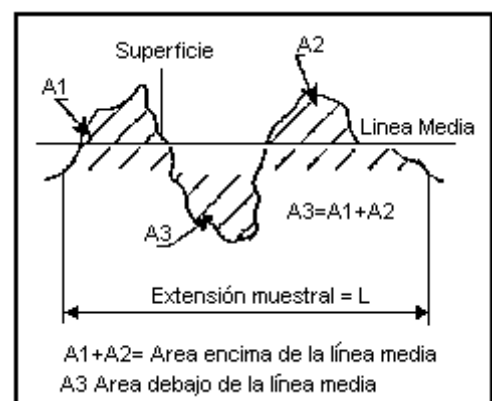


Figura 11

También puede ser definida como la línea que quedaría si los picos fueran nivelados para compensar a los valles.

La línea media es trazada para cada compartimiento de muestra, si la ondulación fuera excluida, la forma de trazado de cada compartimiento de muestra formaría una línea recta e ininterrumpida como se ilustra en la figura 12.

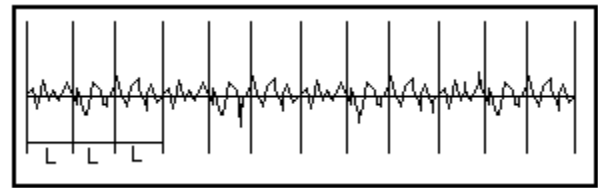


Figura 12

Si la ondulación no fuera excluida, la forma del trazado acompañaría a la forma general del perfil, podrá tener inclinación diferente y podrá ser interrumpida para cada compartimiento de muestra, como muestra la figura 13.

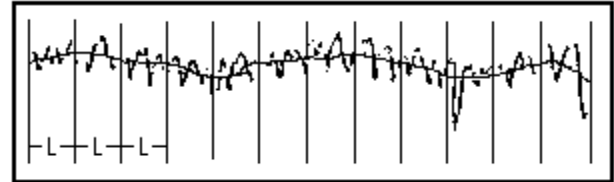


Figura 13

Dentro de cada compartimiento de muestra o módulo de medición la línea media es teóricamente recta, entretanto su inclinación en relación a la forma nominal de la superficie depende de la ondulación, de esta forma cuando la Línea Media está determinada gráficamente, ella podrá ser tratada como una línea recta. Cuando la Línea Media está determinada por medio de filtros podrá ser curva, más eso no causará variaciones significativas en los resultados de las mediciones.

La longitud de los módulos de medición debe ser suficiente para poder evaluar la rugosidad, esto es, debe contener todos los detalles representativos de rugosidad y excluir aquellos inherentes a la ondulación.

Es de gran importancia que esos módulos de medición sean correctamente definidos en relación al tipo de rugosidad. Por ejemplo, si el módulo de medición es L (figura 13), conseguirá aislar la rugosidad de la ondulación satisfactoriamente.

De forma tal que si una línea media (recta) fuera trazada para cada L_1 posteriormente alineadas, como resultado tendremos el perfil original con una ondulación filtrada (figura 12).

Un módulo demasiado pequeño no será representativo de la superficie, dando error al evaluar la rugosidad. Los resultados de mediciones repetidas, realizadas en esas condiciones, darán cierta dispersión. Si en caso contrario el valor del módulo de medición fuera L_1 , mayor que lo necesario, incluiría valores de perfil de ondulación que también afectarían los resultados de medición de rugosidad (figura 14).

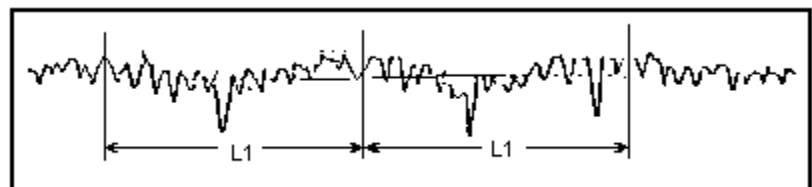


Figura 14

El módulo de medición es conocido también como CUT-OFF y no debe ser confundido con la longitud de medición. Su función es la de actuar como filtro, y normas internacionales establecen cinco veces el módulo como mínimo para realizar una evaluación de la rugosidad de una superficie.

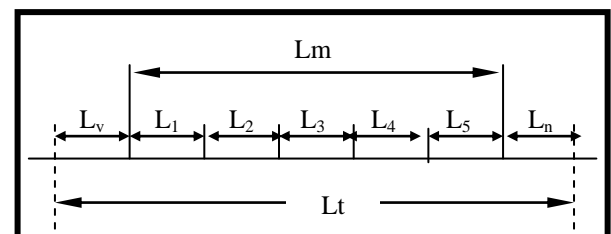


Figura 15

Existen modernos equipos para la medición de rugosidad a través de palpadores de aguja y que consideran un trecho inicial y otro final en la carrera total de palpado, cuya única finalidad es la de permitir el amortiguamiento de las oscilaciones del sistema, en especial las oscilaciones iniciales, figura 15.

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 \quad \text{Extensión de muestra (cut-off)}$$

$$L_v = \text{Longitud inicial}$$

$$L_n = \text{Longitud final}$$

$$L_m = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad \text{Longitud de medición}$$

$$L_t = L_v + L_m + L_n$$

Parámetros de rugosidad

Los parámetros de medición de rugosidad, basados en la Línea media “M” son agrupados en tres clases:

- Los que se basan en la medida de la profundidad de la rugosidad
- Los que se basan en medidas horizontales
- Los que se basan en medidas proporcionales

Sistemas basados en la profundidad de la rugosidad

Ra – Rugosidad media aritmética: Conocido también como CLA (Center Line Average, de Inglaterra), AA (Aritmetical Average de U.S.A.) y hm (término usado por las normas IRAM). Está definido como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición L_m , figura 16.

Esta medida puede ser definida también como: siendo (**a**) la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la Línea Media, siendo la longitud de medición L_m .

$$Ra = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y| dx$$

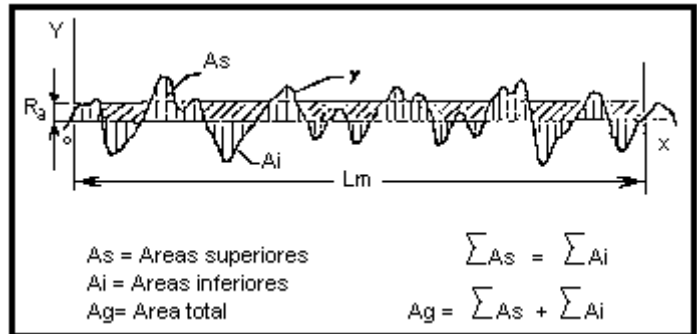


Figura 16

NOTA: Por aproximación se puede determinar el valor de Ra por medio de un cierto número de ordenadas de puntos del perfil

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|$$

y = ordenada

n = número de ordenadas consideradas

El valor de “n” es prefijado de acuerdo con el tipo de aparato.

La medida del valor Ra puede ser expresada en μm o en μin (sistema métrico ó en pulgadas respectivamente).

A fin de racionalizar la cantidad de valores del parámetro a ser utilizados en diseños y especificaciones, la norma recomienda los que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros normalizados de Ra (μm)

0,008	0,040	0,20	1,00	5,0	25,0
0,010	0,050	0,25	1,25	6,0	32,0
0,012	0,063	0,32	1,60	8,0	40,0
0,016	0,080	0,40	2,00	10,0	50,0
0,020	0,100	0,50	2,50	12,5	63,0
0,025	0,125	0,63	3,20	16,0	80,0
0,032	0,160	0,80	4,00	20,0	100,0

La determinación del módulo de medición (Cut-off) y la longitud de medición están ligados a la rugosidad media que se desea medir, según detalla la tabla 2.

Tabla 2

Rugosidad Ra [μm]	Cut-Off [mm]	Longitud de medición [mm]
hasta 0,1	0,25	1,25
0,1 a 2	0,8	4
2 a 10	2,5	12,5
10	8	40

 Tabla 3. Valores de Ra (μm) para algunas aplicaciones

Ra [μm]	Aplicaciones típicas de rugosidad superficial
0,01	Bloques patrón – Reglas de alta precisión – Guías de aparatos de medida de alta precisión
0,02	Aparatos de precisión- Superficies de medida en micrómetros y calibres de precisión
0,03	Calibradores. Elementos de válvulas de alta presión hidráulica
0,04	Agujas de rodamientos. Superacabado de camisas de block de motores
0,05	Pistas de rodamientos. Piezas de aparatos control de alta precisión
0,06	Válvulas giratorias de alta presión. Camisas block de motor.
0,08	Rodamientos de agujas de grandes rodamientos
0,1	Asientos cónicos de válvulas. Ejes montados sobre bronce, teflón, etc. a velocidades medias. Superficies de levas de baja velocidad.
0,15	Rodamientos de dimensiones medias. Protectores de rotores de turbinas y reductores.
0,2	Anillos de sincronizados de cajas de velocidades
0,3	Flancos de engranaje. Guías de mesa de máquinas-herramientas
0,4	Pistas de asientos de agujas en crucetas.
0,6	Válvulas de esfera. Tambores de freno.
1,5	Asientos de rodamiento en ejes c/carga pequeña. Ejes-agujeros de engranajes. Cabezas de pistón
2	Superficies mecanizadas en general, ejes, chavetas, alojamientos, etc.
3	Superficies mecanizadas en general. Superficies de referencia. Superficies de apoyo
4	Superficies desbastadas
5 a 15	Superficies fundidas y estampadas
>15	Piezas fundidas, forjadas y laminadas.

Empleo del parámetro Ra

- Cuando sea necesario el control de la rugosidad en forma continua en las líneas de producción, debido a la facilidad de obtención del resultado.
- Superficies donde el acabado presenta los surcos de mecanizado bien orientados (torneado, fresado)
- Superficies rectificadas, bruñidas, lapidadas, etc.
- Superficies de poca responsabilidad, por ejemplo, acabados con fines apenas estéticos.

Ventajas del parámetro Ra

- Es el parámetro más utilizado en todo el mundo.
- Es un parámetro aplicable a la mayoría de los procesos de fabricación.
- Debido a su gran utilización, casi la totalidad de los equipos presentan este parámetro, en forma analógica o digital.
- Las marcas inherentes al proceso de mecanizado no alteran sustancialmente su valor.
- Para la mayoría de las superficies la distribución está de acuerdo con la curva de Gauss y es generalmente observado que el valor de Ra, da un buen parámetro estadístico que caracteriza la distribución de amplitud.



Desventajas del parámetro Ra

- El valor de Ra en un módulo de medición representa la media de la rugosidad, por eso un pico o valle no típico en una superficie, va a alterar el valor de la medida, no representando fielmente el valor medio de la rugosidad.
- El valor de Ra no define la forma de la irregularidad de un perfil, de esa forma podremos tener un valor de Ra prácticamente igual para superficies con procesos de acabado diferentes.
- Ninguna distinción es hecha entre picos y valles.
- Para algunos procesos de fabricación donde hay una diferencia muy alta de picos y valles, como ocurre en los sinterizados, el parámetro no es el adecuado, ya que la distorsión provocada por el filtro eleva el error a niveles inaceptables.

La norma DIN 4769, para una mayor facilidad de especificación y control, divide en grados los diferentes valores de Ra en μm como muestra la tabla 4.

Tabla 4

Ra [μm]	Nº de Grado de Rugosidad
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1


 Rugosidad
aumenta


A continuación se da una relación de equivalencias entre indicaciones a través de triángulos de acabado y valores de Ra y aplicaciones.

Tabla 5

RELACION ENTRE INDICACIONES EN DISEÑO Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL			
Indicación en Diseño	Ra (CLA) [μm]	Exigencias de calidad superficial	Ejemplos de aplicación
	0,1	Fines especiales	Superficies de medición de calibres. Ajustes de presión no desmontables, superficies de presión alta, fatigadas.
	0,10-0,25-0,4	Exigencia máxima	
	0,6-1-1,6	Alta exigencia	Superficies de deslizamiento muy fatigadas, ajustes de presión desmontables
	2,5 – 4 – 6	Exigencia media	Piezas fatigadas por flexión o torsión, ajustes normales de deslizamiento y presión.
	10 – 16 - 20	Poca exigencia	Ajustes fijos sin transmisión de fuerza, ajustes leves, superficies sin mecanizado, prensados con precisión.
	40 – 60 – 100	Sin exigencia particular	Superficies desbastadas, fundidas a presión
	160 – 250 – 400 800 - 1000	Superficies en bruto	Piezas fundidas, estampadas o forjadas.

Rq - Rugosidad media cuadrática: Está definido como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las ordenadas del perfil efectivo en relación a la Línea Media en un módulo de medición.

Matemáticamente
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2 dx}$$

Aproximadamente
$$Rq = \sqrt{\sum_{i=1}^n y^2}$$
 Siendo n el nº de ordenadas

Empleo del parámetro Rq:

- Superficies donde el acabado presenta los surcos bien orientados (torneado, fresado, etc.)
- Superficies donde Ra presenta poca resolución

Ventajas del parámetro Rq:

- Comparado con Ra este parámetro tiene el efecto de dar peso extra para altos valores (cerca del 11% mayor que Ra, diferencia que pasa a ser importante en muchos casos).
- Para superficies donde la detección de picos ó valles se torna importante, evidenciándolos mas que con Ra, pues acentúa el error al elevarlo al cuadrado.

Desventajas del parámetro Rq

- Poco utilizado
- Es más difícil de obtener gráficamente que Ra.
- Tal como Ra, no define la forma de la irregularidad.
- Normalmente debe ir acompañado de Rmáx o Rt.

Z - Rugosidad parcial Zi (i = 1 a 5) Es igual a la suma de las ordenadas (en valor absoluto) de los puntos mas alejados de la línea media dentro de cada módulo, figura 17. En la representación gráfica del perfil este valor corresponde a la distancia entre los puntos máximo y mínimo del perfil dentro del recorrido correspondiente a cada módulo de medición Le.

Empleo del parámetro Z

- Usado apenas para el análisis de superficies, ya que no es aconsejable para especificaciones de diseño.
- Usado para determinar Rmáx, Ra, y Rz.

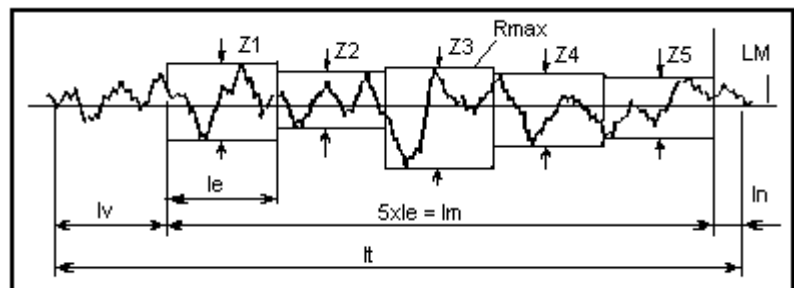


Figura 17

Ventajas del parámetro Z

- Indica información complementaria al parámetro Ra.
- Indica la posición en que se encuentra el mayor Z, esto es, indica el número de recorridos evaluados en que se encuentra el mayor Z.
- Responsable de la obtención de Rmáx y Rz.
- Cuando el equipamiento de medición lo indica, el gráfico de superficie es de fácil obtención.

Desventajas del parámetro Z

- No todos los equipos de medición de rugosidad indican este parámetro.
- Individualmente no caracteriza al perfil de la superficie.
- Parámetro auxiliar, no debe ser especificado en diseño.

Rz – (DIN 4768) Rugosidad media: Es la media aritmética de los valores de rugosidad parcial Zi correspondientes a cada uno de los cinco módulos integrantes de la longitud de medición (el tramo individual de mayor Zi se designa como Rmáx).

$$R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

Empleo del parámetro R_z

- Puede ser usado en los casos en que los puntos aislados no influyen la función de la pieza a ser controlada. Por ejemplo, superficies de apoyo de deslizamiento, ajustes prensados, etc.
- En superficies donde el perfil es periódico y conocido.

Ventajas del parámetro R_z

- De fácil obtención a través de equipos que ejecuten gráficos.
- En perfiles periódicos define muy bien la superficie.
- Surcos aislados serán considerados parcialmente, de acuerdo a la cantidad de puntos aislados.

Desventajas del parámetro R_z

- En algunas aplicaciones esa consideración parcial de los puntos aislados no es aconsejable, pues una alteración significativa en un “punto aislado”, será ponderada solo en un 20%.
- Al igual que R_{\max} , no posibilita ninguna información sobre la forma del perfil, como así tampoco la distancia entre las ranuras.
- No todos los equipos suministran este parámetro.

R_{\max} - Rugosidad máxima: Es la mayor de las rugosidades parciales (Z_i) que se presentan en el trecho de medición L_m . Por ejemplo, en la figura 17 corresponde al valor Z_3

Empleo del parámetro R_{\max}

- Superficie dinámicamente cargada.
- Superficies de deslizamiento donde el perfil efectivo es periódico, más debe ir acompañado de inclinación y ondulación.

Ventajas del parámetro R_{\max}

- Informa sobre el máximo deterioro en la dirección vertical respecto al perfil de la superficie de la pieza.
- Cuando el equipo de medición lo posee, el gráfico de la superficie es de fácil obtención.
- Tiene gran uso en la mayoría de los países.
- Contiene información complementaria respecto del parámetro R_a (incluye los valores de los picos y valles).

Desventajas del parámetro R_{\max}

- No todos los equipos contienen el parámetro y para valorarlo a través del gráfico es preciso tener certeza de que el perfil registrado es un perfil de rugosidad. En este caso se parte del perfil efectivo (sin filtrado) y debe ser realizado el filtrado gráficamente.
- Puede dar una imagen errónea de la superficie, pues evalúa errores que muchas veces no representan a la superficie como un todo. Por ejemplo, un surco que fue causado durante el mecanizado y que no caracteriza al proceso.
- Individualmente no presenta información suficiente respecto de una superficie, esto es, no da información sobre su forma. Los gráficos de la figura 18 son de superficies muy diferentes, sin embargo tienen todos igual valor R_{\max} .



Figura 18. Todos con $R_{\max} = 15 \mu\text{m}$

Rt - Profundidad total de la rugosidad: Es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de la longitud de medición (figura 19).

Empleo del parámetro Rt:

- Tiene las mismas características que $R_{m\acute{a}x}$, pero con mayor rigidez, pues considera la longitud de medición igual a la longitud de palpado del equipo.

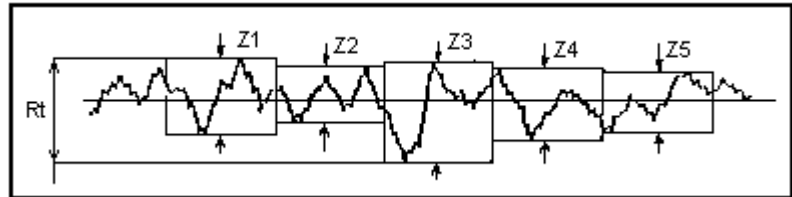


Figura 19

Ventajas del parámetro Rt

- Es más rígido en la evaluación que $R_{m\acute{a}x}$, pues considera toda la longitud de evaluación (carrera del palpador) y no como el caso de $R_{m\acute{a}x}$ que desprecia un trecho al comienzo y al fin de la carrera de medición.
- Cuando el rugosímetro lo suministra, el gráfico de la superficie es más fácil de obtener que $R_{m\acute{a}x}$.

Desventajas del parámetro Rt

- En algunos casos la rigidez de evaluación lleva a resultados engañosos.
- Poco utilizado fuera de Alemania.
- Tiene todas las desventajas de $R_{m\acute{a}x}$

Rp: Cresta mayor del perfil: Distancia entre el punto más alto del perfil y la línea media (figura 20).

Rpi – Profundidad de elevamiento: Es la distancia vertical entre el pico más alto y la Línea media dentro de cada módulo de medición, usado para el análisis de superficies y en la determinación de los parámetros R_p y R_{pm} , puede ser un parámetro auxiliar (figura 20).

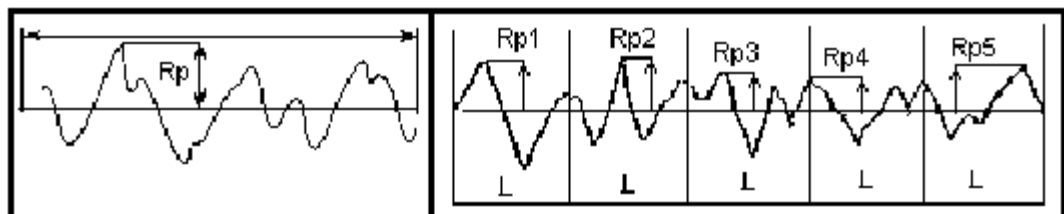


Figura 20.

Rpm - Altura media de las crestas: Media aritmética entre las alturas de las crestas más altas (R_{pn}), determinada para 5 módulos (Cut-Off) de medición.

$$R_{pm} = \frac{R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_{p4} + R_{p5}}{5} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 R_{pi}$$

Rv - Valle más profundo: Distancia entre el punto más bajo del perfil y la línea media (figura 21).

Rvm: Profundidad media de los valles: Media aritmética entre los valles más profundos (R_{vi}), determinada para 5 módulos.

$$R_{vm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{vi}$$

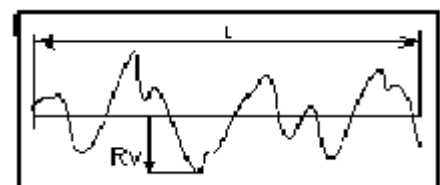


Figura 21

R_z (ISO) – Altura de las irregularidades en 10 puntos: Es diferente al R_z (DIN) anteriormente presentado. Corresponde a la diferencia entre el valor medio de las coordenadas de los cinco puntos más profundos medidos a partir de una Línea de Referencia, no interceptando el perfil de rugosidad en la carrera de medición. (figura 22).

$$R_z (ISO) = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5}$$

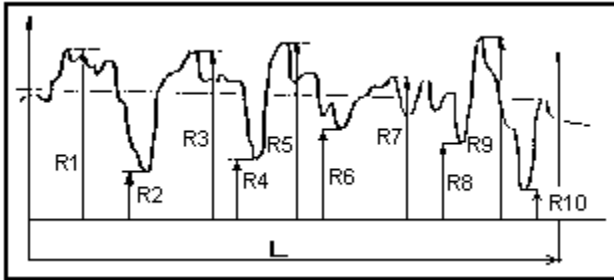


Figura 22

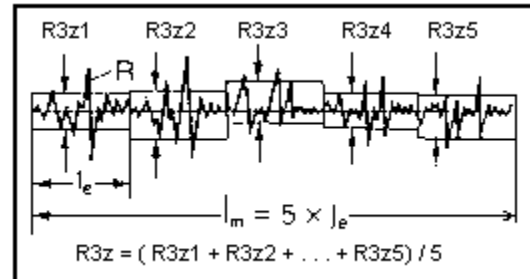


Figura 23

R_{3z} Rugosidad calculada (Basada en DIN 4768). Para un longitud de medida subdividida en 5 tramos, se toma en cada uno el tercer pico mas alto y el tercer valle mas profundo obteniendo R_{3zi}. R_{3z} se obtiene como promedio de los 5 tramos (figura 23).

Sistemas basados en medidas horizontales

S_m – Paso medio de la rugosidad: Media aritmética del paso que comprende crestas y valles adyacentes (figura 24).

S – Espaciado medio entre crestas vecinas: Media aritmética del espaciado entre crestas vecinas (fig. 25)

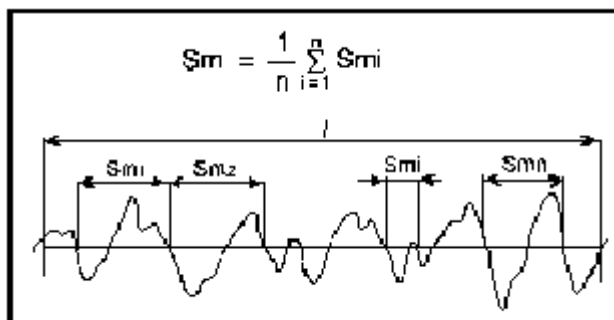


Figura 24

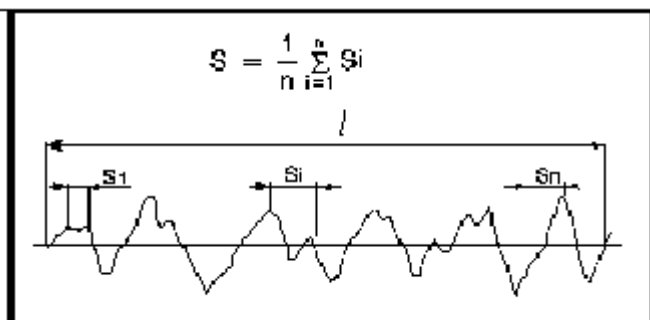


Figura 25

P_c - Conteo de crestas: Número de crestas por unidad de longitud (10 mm o 1")

$$P_c = \frac{1}{S_m}$$

Cortado de los picos S₁ y S₂. Es el número de picos del perfil de rugosidad que exceden la línea de corte (línea imaginaria que corre paralela a la línea de referencia que surge del filtrado del perfil). La

distancia de la línea de corte a la línea de referencia es una variable que puede ser escogida en función del análisis que está siendo hecho. Existen dos parámetros de corte de picos el S1 y el S2, siendo la diferencia entre ambos la siguiente:

S1 es una línea de corte que corre paralelamente por encima de la línea de referencia.

S2, es una línea de corte que corre paralelamente por debajo de la línea de referencia

HSC: Conteo de Crestas emergentes: N° de crestas por unidad de longitud que emergen sobre un dado nivel de altura paralelo a la línea media (figura 26).

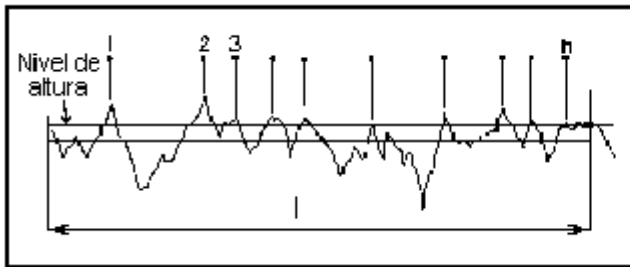


Figura 26

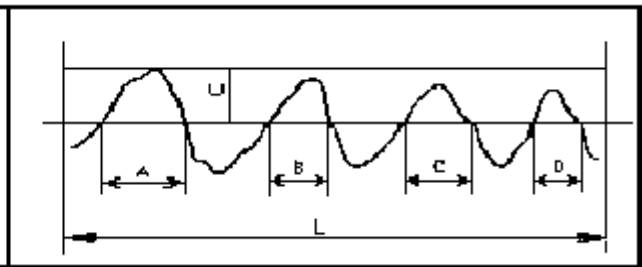


Figura 27

Lc – Longitud de contacto a una profundidad c: Es la suma de los segmentos de una línea paralela a la dirección general del perfil, situada a una profundidad c debajo de la saliente más alta, interceptadas por el perfil efectivo, en la longitud de medición L (figura 27).

$$L_c = A + B + C + D + \dots$$

Sistemas basados en medidas proporcionales

Ke – Coeficiente de vaciamiento: Es la relación entre la profundidad media R_{pm} y la altura máxima de las irregularidades (figura 28):

$$K_e = \frac{R_{pm}}{R_{max}}$$

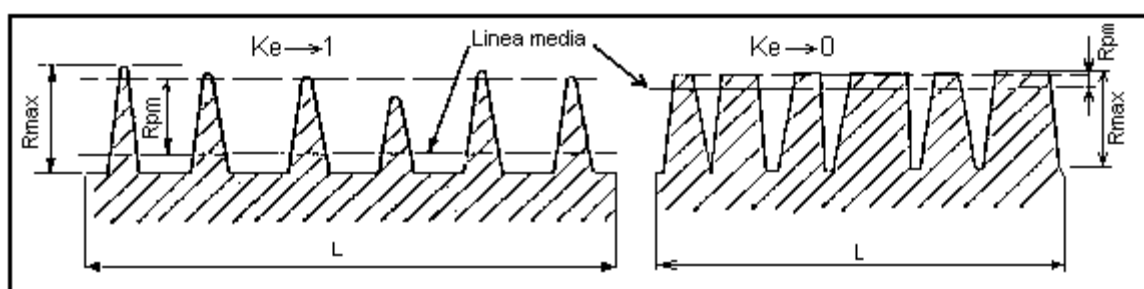


Figura 28

El coeficiente de vaciamiento K_e define el tipo de superficie obtenida y su aplicación práctica en relación a la rugosidad superficial.

Se observa que, cuando R_{pm} aumenta y tiende a R_{max} , la línea media tiende a desplazarse hacia abajo, con K_e tendiendo a 1. Se obtendrá en ese caso una superficie con muchas crestas, teniendo por tanto propiedades funcionales malas, principalmente para aplicaciones en que se requieren alta capacidad de carga y buena resistencia al desgaste (figura 28 izquierda).

Inversamente cuando Rpm disminuye la línea media tiende a desplazarse hacia arriba con Ke tendiendo a cero. La superficie obtenida en este caso tendrá pocas crestas, teniendo así buenas propiedades funcionales (figura 28, derecha).

Kp – Coeficiente de llenado: Es la diferencia entre la unidad y el coeficiente de vaciamiento.

$$K_p = 1 - K_e$$

Tp – Fracción de contacto: Es la relación entre la superficie portante ($L_c = L_1 + L_2 + \dots + L_n$) para la profundidad c y la longitud de medición L_m (figura 29).

$$t_p = \frac{1}{l_m} (L_1 + L_2 + \dots + L_n) \times 100 \quad [\%]$$

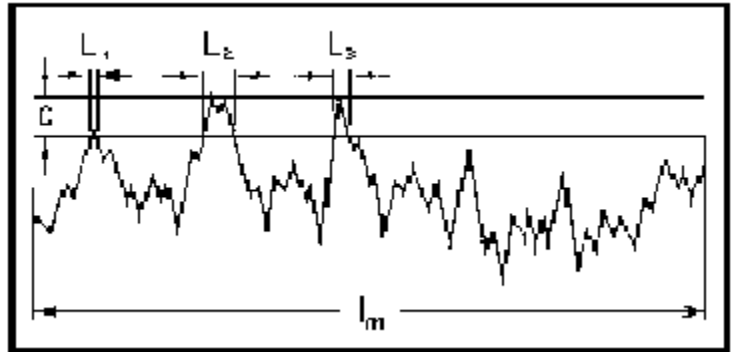


Figura 29

Curva de Abbott: Es un gráfico en el que se representa el % de material por encima de un nivel determinado de profundidad, referido al pico más alto del perfil. La forma de la curva de Abbott da una idea de la forma del perfil de rugosidad y las características funcionales de la superficie. Se tiene el 100% del material por encima, en el nivel correspondiente al valle más profundo. La figura 30 muestra un perfil de rugosidad y su curva de Abbott.

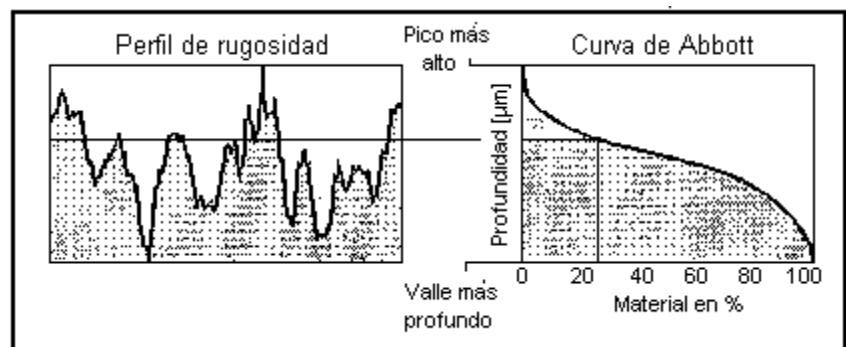


Figura 30

Sk - Asimetría del perfil:

Es una medida de la asimetría de la curva de distribución de amplitudes de las divergencias del perfil. (figura 31, En la izquierda se muestra una ampliación localizada del perfil).

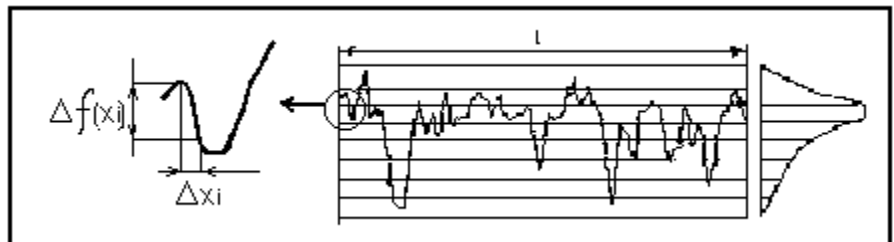


Figura 31

$$S_k = \frac{1}{Rq^3} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(X_i)^3$$

Δa: Inclinación Media del perfil: Media aritmética de las pendientes del perfil integrada en pequeños intervalos.

$$\Delta a = \frac{1}{l} \int_0^l \left| \frac{df(x)}{dx} \right| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta f(x_i)}{\Delta x} \right|$$

Algunos ejemplos de superficies: La figura 32 muestra los perfiles de 3 superficies, con el valor de sus parámetros Ra y Rz. Se aprecia que siendo Ra prácticamente igual en las tres, pueden esperarse propiedades funcionales diferentes. El valor de Rz proporciona en este caso una información adicional que ayuda a definir mejor a las superficies. Quizás sea necesario tener mas información todavía.

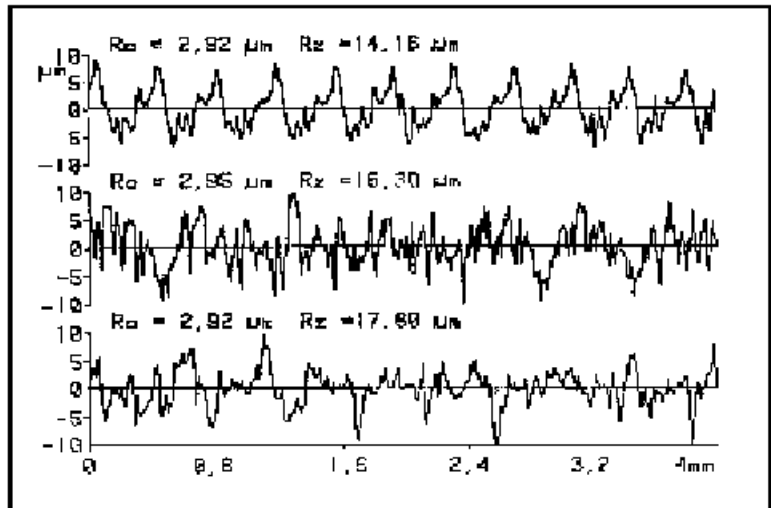

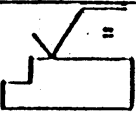

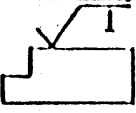

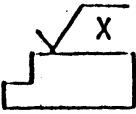
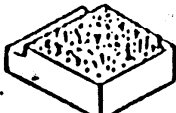
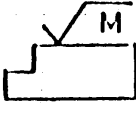

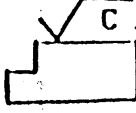

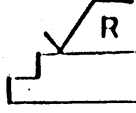


Figura 32

Orientación de los surcos y dirección de la medición

SIGNOS CONVENCIONALES	PERSPECTIVA ESQUEMATICA	INDICACION EN DISEÑO	ORIENTACIÓN DE LOS SURCOS	DIRECCION DE MEDICION DE LA RUGOSIDAD O DEL PLANO DEL PERFIL.
=			Los surcos deben ser orientados paralelamente al trazo de la superficie sobre la cual está el símbolo.	Perpendicular a la dirección de los surcos.
⊥			Los surcos deben ser orientados en dirección normal al trazado de la superficie.	Perpendicular a la dirección de los surcos.
X			Los surcos deben ser orientados según las direcciones cruzadas.	Según la bisectriz de los ángulos formados por las direcciones de los surcos.
M			Los surcos deben ser orientados según varias direcciones.	En cualquier dirección.
C			Los surcos deben ser concéntricos, con el centro en la superficie a la que el símbolo se refiere.	Radial.
R			Los surcos deben ser orientados según direcciones radiales en relación al centro de la superficie.	Normal a un radio.

Procesos de mecanizado y valores de CUT-OFF admisibles

Proceso de acabado	Rango de valores de Ra esperados		Valores de cut-off admisibles		
	μm	μinch	0,25 μm 0,01 μin	0,8 μm 0,03 μin	2,5 μm 0,1 μin
Superacabado	0,025 - 0,20	1 - 0	x	x	
Lapidado	0,025 - 0,40	1 - 16	x	x	
Pulimento	0,025 - 0,40	1 - 16		x	X
Pulido (liso)	0,10 - 0,40	4 - 16		x	X
Bruñido	0,10 - 0,80	4 - 32	x	x	
Esmerilado	0,10 - 1,6	4 - 64	x	x	X
Perforado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado con Diamante	0,20 - 0,40	8 - 16	x	x	
Torneado	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Perforado con Mecha	0,40 - 6,30	16 - 250		x	X
Trefilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	X
Mandrilado	0,80 - 3,20	32 - 125		x	x
Fresado	0,80 - 6,30	32 - 250		x	x
Electroerosión	1,60 - 6,30	64 - 250		x	x
Modelado por Prensa	1,60 - 12,50	64 - 500	x	x	
Aplanamiento	1,60 - 12,50	64 - 500		x	x
Electrodeposición	0,80 - 0,80	8 - 32			x
Fresado químico	1,60 - 6,30	63 - 250	x	x	
Laser	1,60 - 6,30	63 - 250		x	
Aserrado	1,60 - 25,0	63 - 1000		x	x
Extrusión	0,80 - 3,20	32 - 125		x	
Fundición a presión	0,80 - 1,60	32 - 63		x	
Forjado	3,20 - 13,0	32 - 63		x	
Laminación en Caliente	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x
Fundido con molde de arena	13,0 - 25,0	500 - 1000		x	x

Bibliografía

Mitutoyo, "Rugosidad Superficial"

Mitutoyo, Catalog Number E70.

Taylor Hobson, Manual del Rugosímetro Surtronic 3 Plus.