

MODULO Nº 8 - RUGOSIDAD.

Podemos definir como rugosidad a la calidad de terminación superficial, es decir a la calidad de textura de una superficie.

Esta terminación superficial (textura) es de fundamental importancia cuando se trata el tema de las superficies en movimiento entre sí. Este movimiento relativo entre dos piezas que interactúan, trae aparejado la fricción y el desgaste entre ellas, estos factores de gran importancia para la vida útil de las piezas interactuantes dependen fundamentalmente de la geometría, de la separación entre superficies, carga entre piezas, de las propiedades físicas y químicas, del espesor de la película lubricante, etc.

El estudio de la lubricación, fricción y desgaste se conoce hoy con el nombre de Tribología, mientras que las condiciones o el estado de cada una de las piezas (estado de cada superficie) interactuantes, incluyendo la macro y microrugosidad se conoce con el nombre de Textura Superficial.

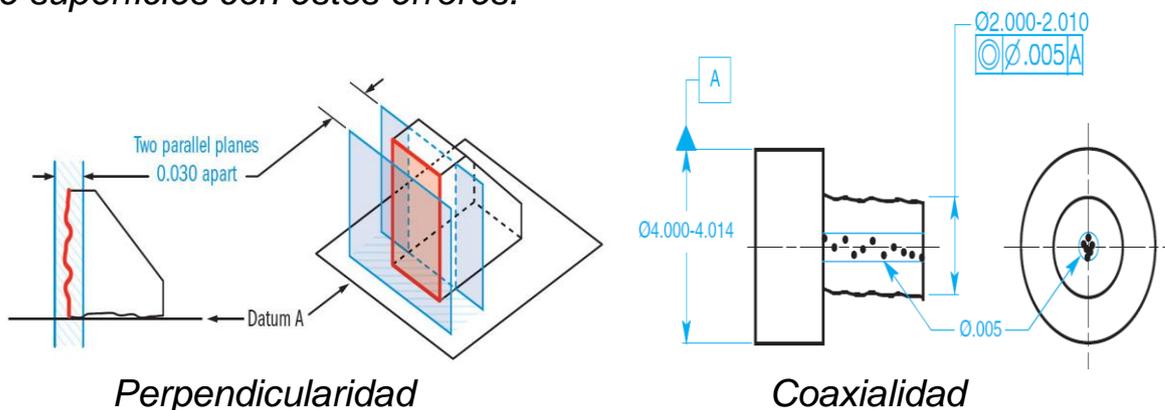
Macrogeometría y Microgeometría.

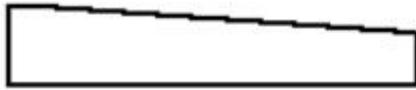
Una superficie perfecta es una abstracción matemática ya que cualquier superficie real por perfecta que parezca presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación.

A estos errores los podemos clasificar en Macrogeométricos y Microgeométricos.

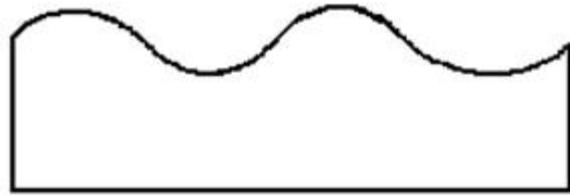
Errores Macrogeométricos:

Son errores de forma asociados con la variación en tamaño de la pieza (paralelismo entre superficies y planitud de una superficie, conicidad, redondez y cilindridad, etc) y que puedan medirse con instrumentos convencionales. Se muestra a continuación algunos ejemplos de superficies con estos errores.

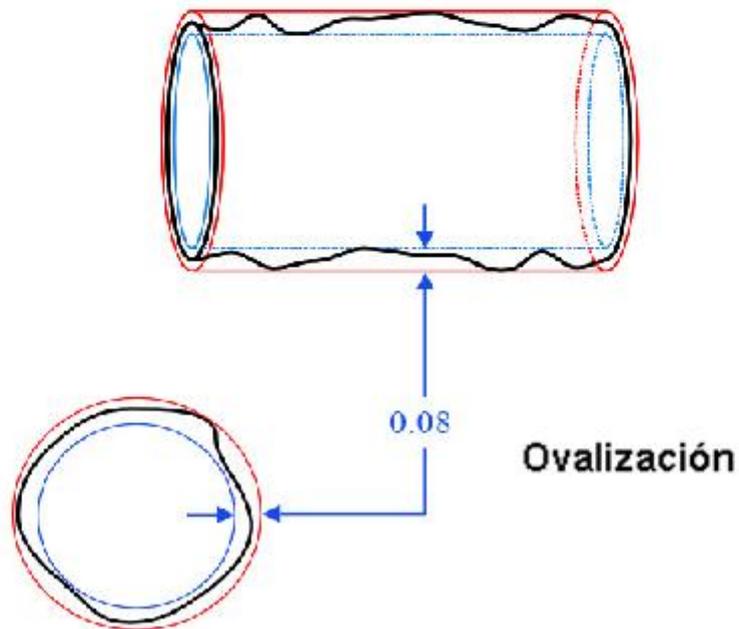




**Falta de paralelismo
entre dos caras**

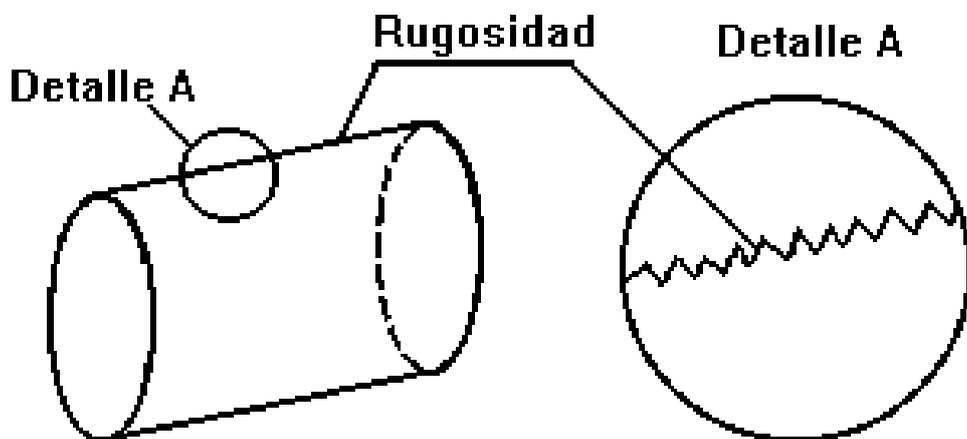
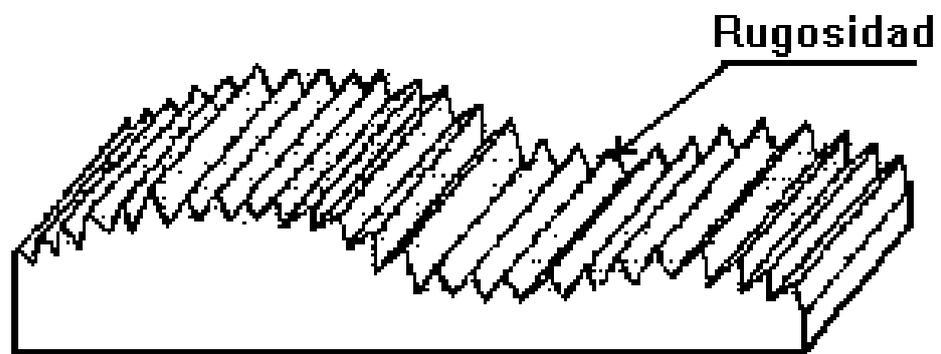
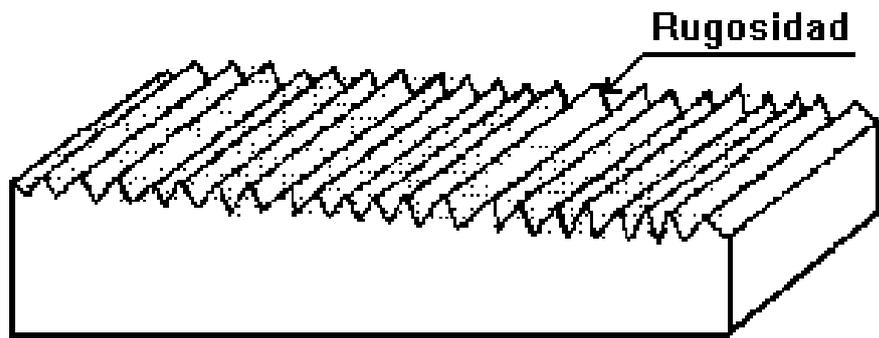


**Alabeo en una
Superficie**



Estos errores son producidos por problemas en las máquinas herramientas tales como juego en bancadas, juego en husillos, carro portaherramientas desalineado, etc.

*Los errores microgeométricos son producidos por la herramienta de corte o la piedra de rectificado y se la denomina **Rugosidad**. Estos errores mencionados se presentan simultáneamente sobre una superficie, tal como veremos en las figuras siguientes.*



Símbolos de Rugosidad.

De acuerdo con la norma ISO 1302-1978, las especificaciones del acabado superficial (Rugosidad) deberán colocarse en relación con el símbolo básico como se muestra a continuación.



a = valor Ra de rugosidad en micrómetros o micropulgadas o números de grado de rugosidad N1 a N12.

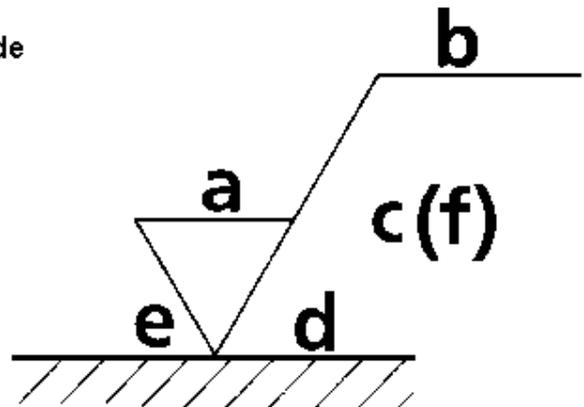
b = método de producción, tratamiento o recubrimiento.

c = longitud de muestreo.

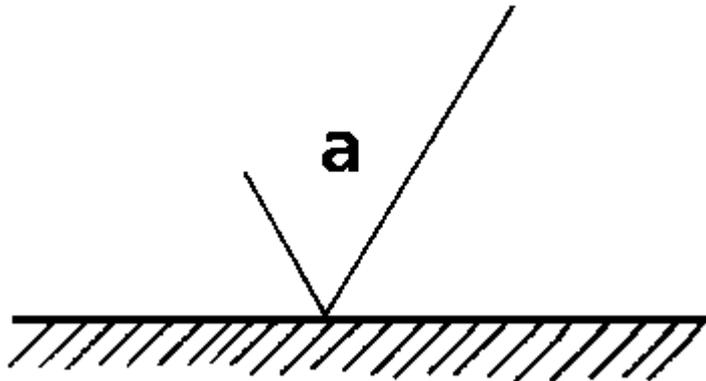
d = dirección del marcado.

e = cantidad que se removerá mediante máquinado.

f = otros parámetros de rugosidad (entre parentesis).



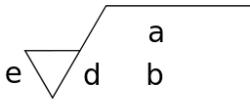
Sin embargo, es común encontrar sólo una indicación como la siguiente :



A continuación se dan algunas recomendaciones prácticas de como proceder en estos casos:

- 1) Determinar si la medición será en μm o en μ pulgadas.*
- 2) Si no se menciona ningún otro parámetro en especial se entenderá que lo especificado es "Ra" (Rugosidad Media Aritmética).*
- 3) El valor numérico mostrado indicará el valor máximo admisible.*
- 4) La longitud de muestreo si no está especificada será de 0,8 mm.*
- 5) La medición se hará perpendicular (\perp) a las marcas del mecanizado.*
- 6) Cuando esté indicado un parámetro de rugosidad diferente a los anteriores, debe contarse con un rugosímetro capaz de medirlo.*

No existen factores para realizar conversiones de un parámetro a otro.

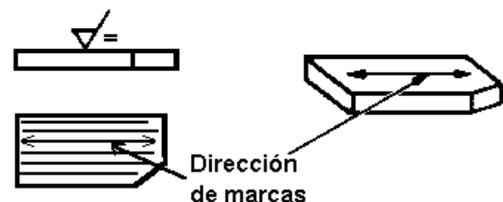
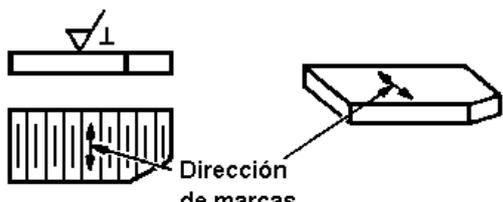
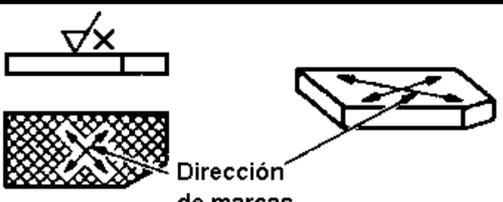
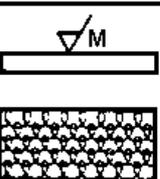
		d	Lay	a	Surface parameter
b	Secondary surface parameter	=	Parallel	D F S-L / Rz N C V	
c	Manufacturing method	⊥	Perpendicular	D	Tolerance direction, upper (U) or lower (L)
e	Minimum material removal	X	Cross-hatch	F	Filter type, for example "2RC"
		M	Multi-directional	S	Short filter cutoff, for removing noise
		C	Circular	L	Long filter cutoff, for removing waviness
		R	Radial	R	Profile type, primary (P), waviness (W), or roughness (R)
		P	Particulate	z	Parameter type, for example "a" for Ra or "3z" for R3z
				N	Assesment length; multiple of sampling length, usually 5
				C	Comparison rule, "max" for 100%, "16%" for 116%
				V	Specified value in micrometers
	 Material removal not allowed				
	 Material removal required				

Importancia de la dirección de palpado según el tipo de mecanizado

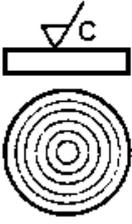
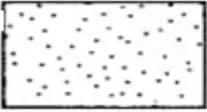
En la figura donde se muestra el símbolo básico con todas las especificaciones podemos ver la letra " d " que nos indica la dirección en que debe hacerse el palpado de acuerdo al tipo de mecanizado.

En la tabla siguiente se muestran los símbolos a usar de acuerdo al mecanizado realizado.

Simbolos para la dirección de marcado

Símbolo	Interpretación
=	<p>Paralelo al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo.</p>  <p>Dirección de marcas</p>
⊥	<p>Perpendicular al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo.</p>  <p>Dirección de marcas</p>
X	<p>Cruzado en dos direcciones inclinadas con relación al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo.</p>  <p>Dirección de marcas</p>
M	<p>Multidireccional.</p> 



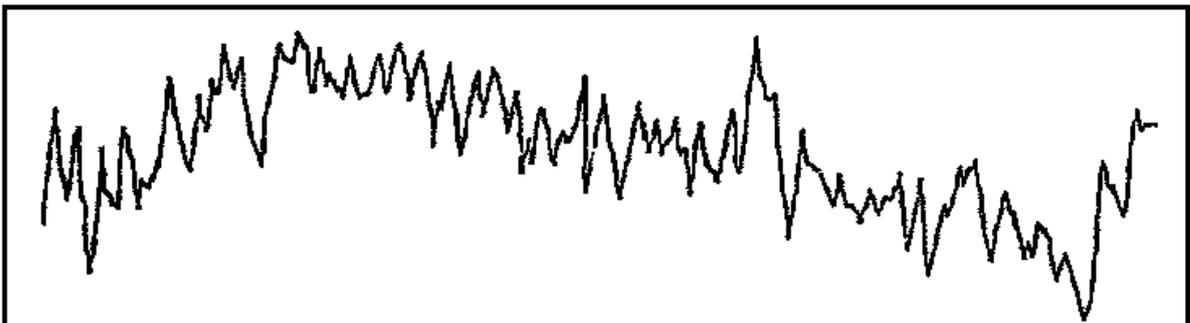
<p>C</p>	<p>Aproximadamente circular en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo.</p>	
<p>R</p>	<p>Aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo.</p>	
<p>P</p>	<p>El formato de la superficie es particular, no hay direcciones y sí pretuberancias</p>	

METER CUT-OFF

Las Curvas P y R

Existen dos tipos de curvas importantes cuando se evalúa rugosidad por el método del perfil: La curva **P** (**perfil sin filtrar**) es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular a la superficie.

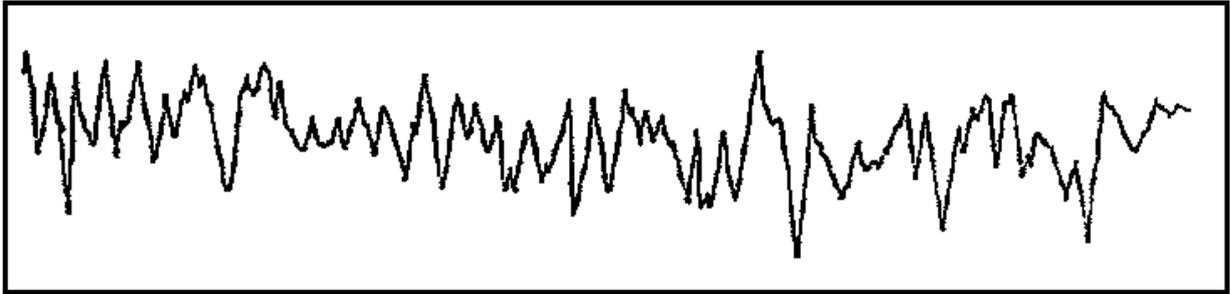
A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad de la superficie; por lo general es la dirección perpendicular a las marcas del maquinado sobre la superficie. En la figura siguiente vemos la curva **P**, o sea, sin filtrar.



La curva **R** (**perfil de rugosidad o perfil filtrado**) es un perfil que se obtiene de la curva **P**, removiendo o filtrando los componentes de la ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que un límite especificado de la longitud de onda llamado valor de “**cut-off**”.



En la figura siguiente vemos la curva R , ya filtrada a través del valor elegido en el rugosímetro.

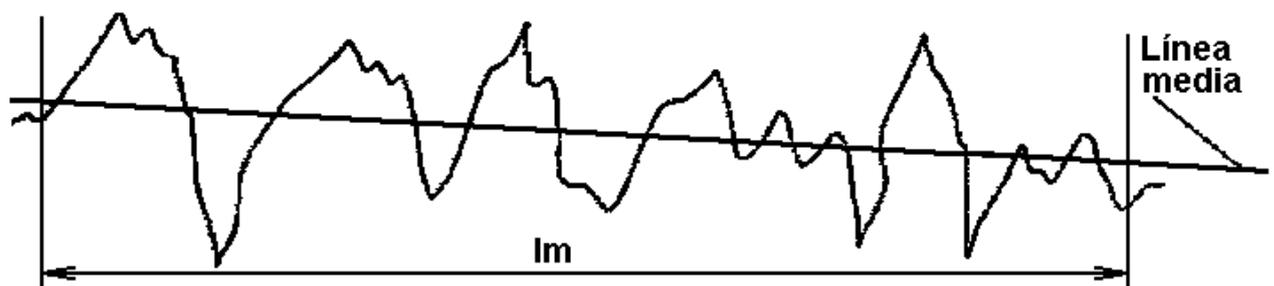


En los rugosímetros la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador, y por lo tanto la onda del perfil para dar lo que se denomina, valor de “cut-off”.

La longitud de muestreo es una longitud física de la superficie. El “cut-off”, está relacionado directamente al largo de muestreo. Hay instrumentos que pueden variar independientemente, largo de medida y “cut-off” (Instrumentos más precisos). Otros donde el “cut-off” seleccionado está fijado por un largo de muestreo determinado.

Para que la medida mostrada por el instrumento sea exacta; éste; teniendo en cuenta la inercia de partida y de frenado; adopta una longitud mayor que la seleccionada, manteniendo la velocidad durante toda la longitud que dura la medición.

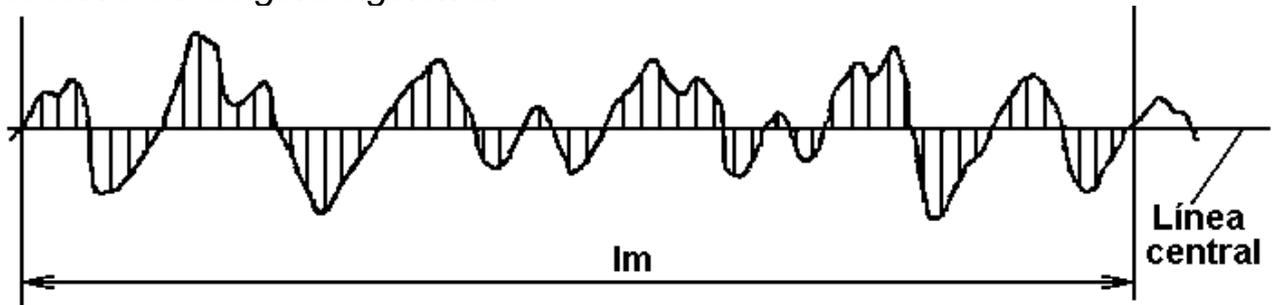
Una línea de referencia con al forma del perfil geométrico y que divide al perfil de modo que, dentro de la longitud de muestreo, la suma de los cuadrados de los alejamientos del perfil desde esta línea, es un mínimo, se denomina línea media. Ver figura:



$$\int_0^{lm} y^2 dx = 0$$



Las medidas de rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central, que es paralela a la línea media del perfil a través de la longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitadas por la línea central y el perfil, es igual en ambos lados, tal como se observa en la figura siguiente:

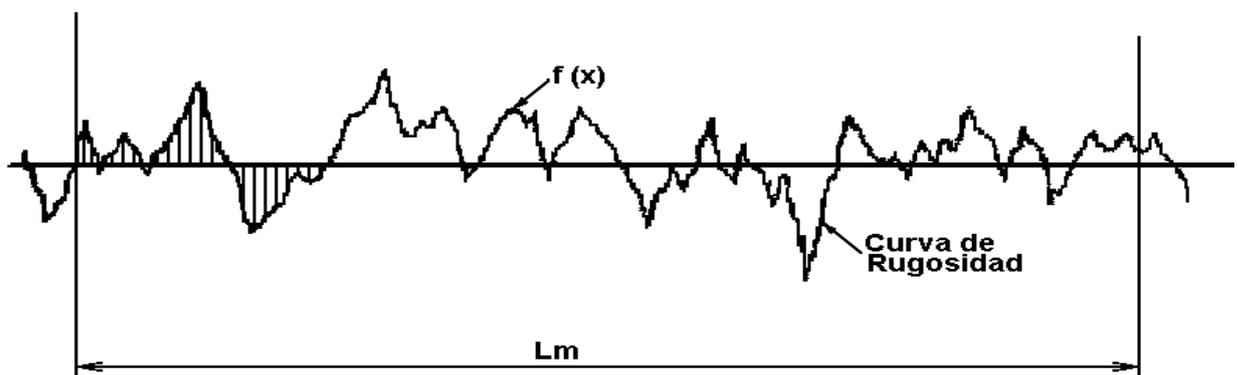


Parámetros Más Usuales

Rugosidad Media Aritmética (Ra)

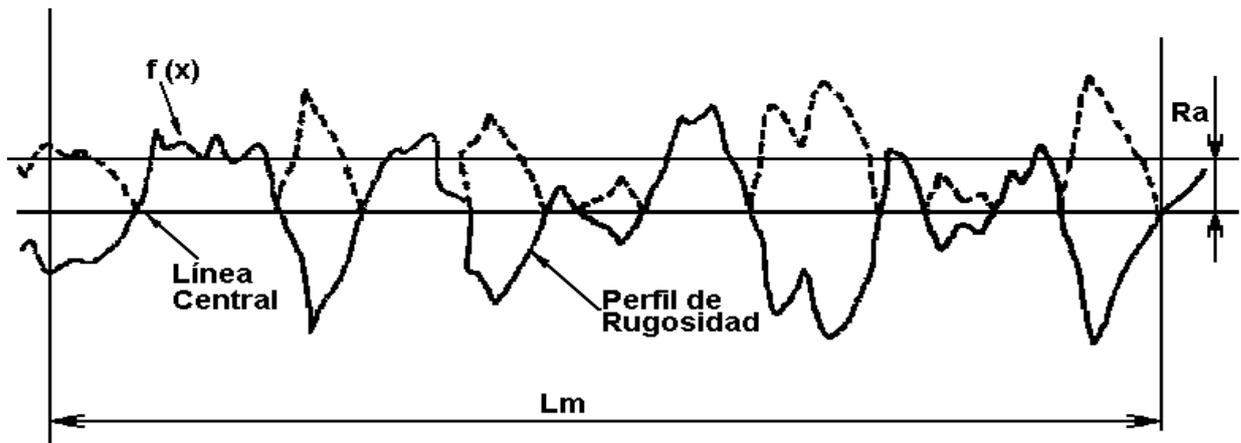
Es la media aritmética de los valores absolutos de todas las ordenadas dentro de la carrera de medición total l_m , luego del filtrado de desviaciones de forma (macrogeometría) y la mayor parte de la ondulación. Este parámetro está normalizado por la DIN 4768/1, 4762/1 y por la ISO 4287/1. R_a es el único parámetro de este tipo, definido en las Normas de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza. También está bien definido en las Normas de todos los países industrializados y en las Normas Internacionales ISO, por lo que es más ampliamente utilizado.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y| dx$$





La definición de R_a equivale en términos prácticos, a la altura de un rectángulo de longitud L_m , cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación (L_m), a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central. Esto se presenta mediante el procedimiento mostrado en la figura siguiente, así R_a es Rugosidad Promedio, también denominada CLA (Center Line Average).

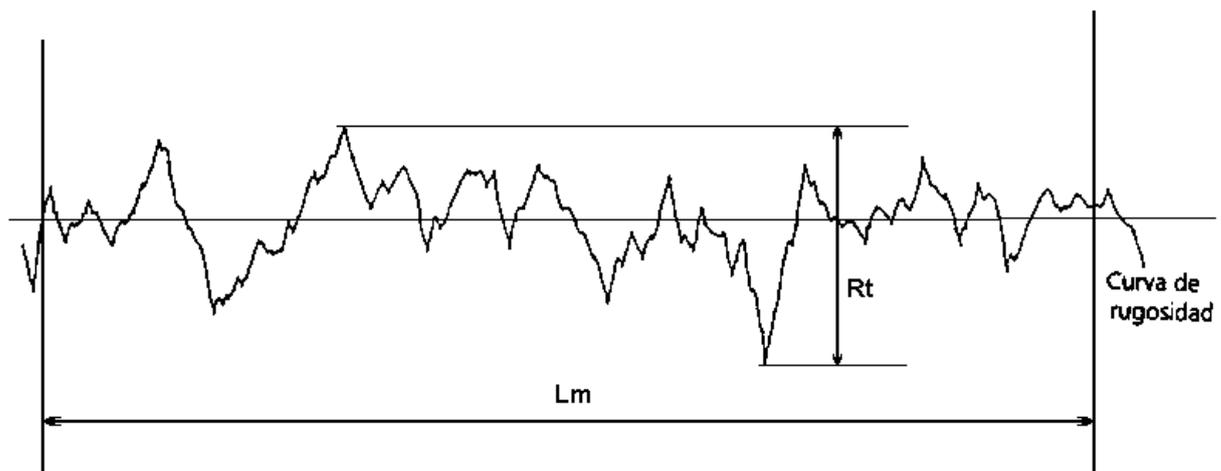


R_a es muy usada para los perfiles de Mecanizado (fresado, torneado, rectificando, electroerosión, etc).

De acuerdo a las normas nuevas también R_a es conocida como S_a .

Rugosidad Total (R_t)

Es la distancia entre la línea de los relieves y la línea de los valles dentro de la carrera de medición L_m (carrera de referencia) de un perfil filtrado según DIN 4762/1 e ISO 4287/1.





Rt es el parámetro que se aplica en superficies a pintar ó donde deben adherirse capas de lubricantes.

Si bien por definición no hay una relación directa de Ra con Rt , es muy común en la rama del Mecanizado encontrar tablas de conversión de Ra a Rt , debido a que los perfiles son más uniformes.

Rt también se lo denomina actualmente como St

Surface Finish Conversion Chart						
N	Rt	Ra	CLA	RMS	Cut-off length	
					Inches	mm
1.	0.3	0.025	1	1.1	0.003	0.08
2.	0.5	0.05	2	2.2	0.01	0.25
3.	0.8	0.1	4	4.4	0.01	0.25
4.	1.2	0.2	8	8.8	0.01	0.25
5.	2.0	0.4	16	17.6	0.01	0.25
6.	4.0	0.8	32	35.2	0.03	0.8
7.	8.0	1.6	63	64.3	0.03	0.8
8.	13	3.2	125	137.5	0.1	2.5
9.	25	6.3	250	275	0.1	2.5
10.	50	12.5	500	550	0.1	2.5
11.	100	25.0	1,000	1,100	0.3	8.0
12.	200	50.0	2,000	2,200	0.3	8.0

N = New ISO scale numbers

Rt = Roughness, total in microns

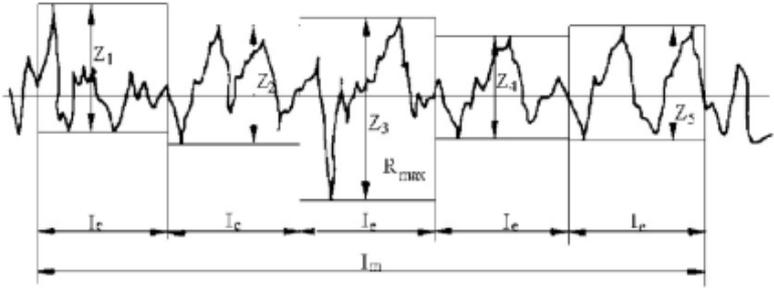
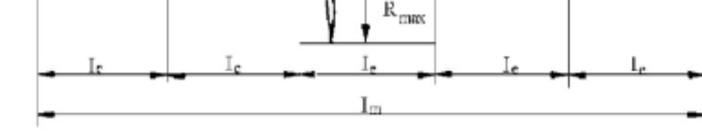
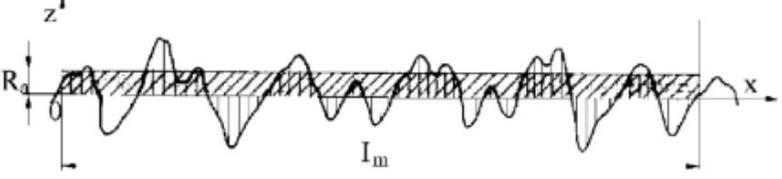
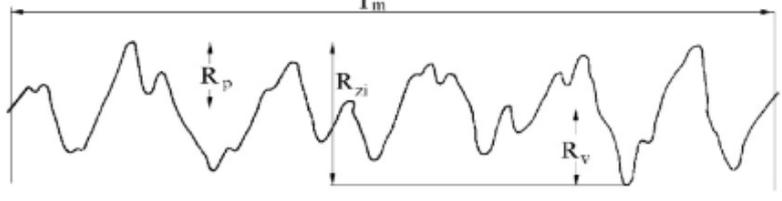
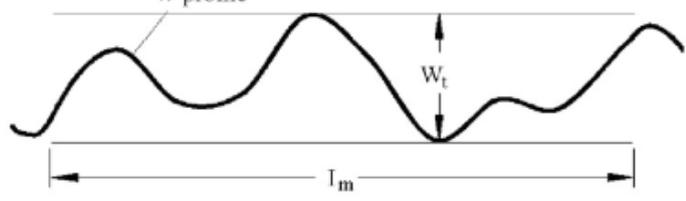
CLA = Center line average in microinches

RMS = Root mean square in microinches

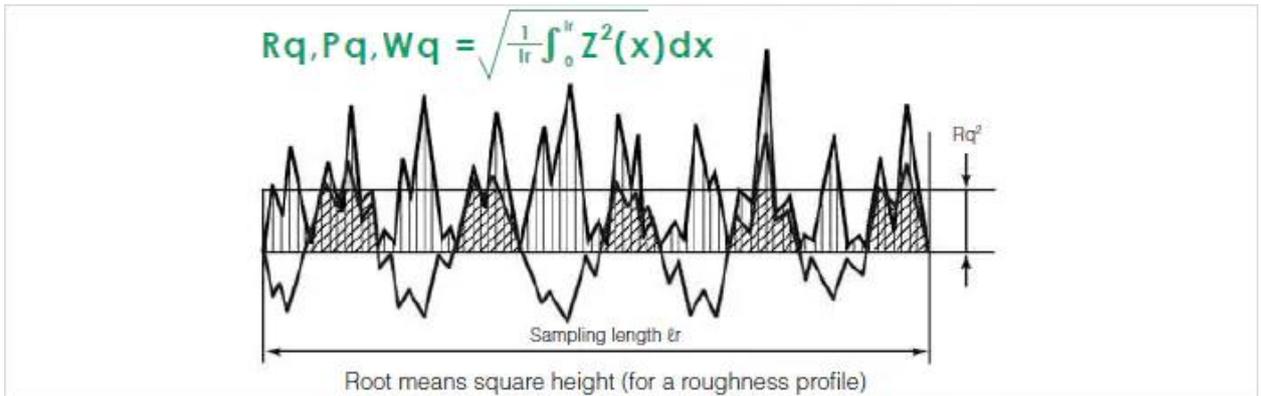
Ra = Roughness, average in microns

Otros Parámetros de Rugosidad



R_z	Height of profile elements EN ISO 4287	$R_z = \frac{1}{5} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$ 
R_{max}	Maximum roughness profile depth EN ISO 4287	
R_a	Average roughness EN ISO 4287	 $R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} z(x) \cdot dx$
R_{zi} R_p R_v	Profile depth EN ISO 4287 Roughness profile peak height EN ISO 4287 Roughness profile valley depth EN ISO 4287	
W_t	Wave depth EN ISO 4287	

También existe RMS (Root Mean Square), también encontrada como R_q y S_q , que es la rugosidad media cuadrática, definida así :



La RMS siempre dá un valor levemente superior a Ra.

Por último están los Grados de Rugosidad, llamados N y numerados, N1, N2, etc. Abarcan distintos intervalos de rugosidad en Micras ó microinch.

Approximate Surface Roughness Conversion Chart				
Roughness Grade Numbers	American System		Metric System	
	Ra (µin)	RMS (µin)	Ra (µm)	RMS (µm)
N12	2000	2200	50	55
N11	1000	1100	25	27.5
N10	500	550	12.5	13.75
N9	250	275	8.3	9.13
N8	125	137.5	3.2	3.52
N7	63	69.3	1.6	1.76
N6	32	35.2	0.8	0.88
N5	16	17.6	0.4	0.44
N4	8	8.8	0.2	0.22
N3	4	4.4	0.1	0.11
N2	2	2.2	0.05	0.055
N1	1	1.1	0.025	0.035

Todos los parámetros están reconocidos por normas internacionales ISO y nacionales DIN, JIS, ANSI etc.

Rugosímetros Táctiles y Electrónicos

El costo de una superficie maquinada crece cuando se desea un mejor acabado superficial, razón por la cual el proyectista deberá indicar claramente cual es el tipo de rugosidad requerida (Ra o Rt) y cual el valor deseado, ya que siempre un buen acabado superficial redundará en un mejor funcionamiento de la pieza, como sucede por ejemplo en los cilindros de un motor de combustión interna, donde el parámetro elegido es "Rt" pues



necesitamos intersticios donde se aloje el lubricante, fundamental en la vida útil de un motor.

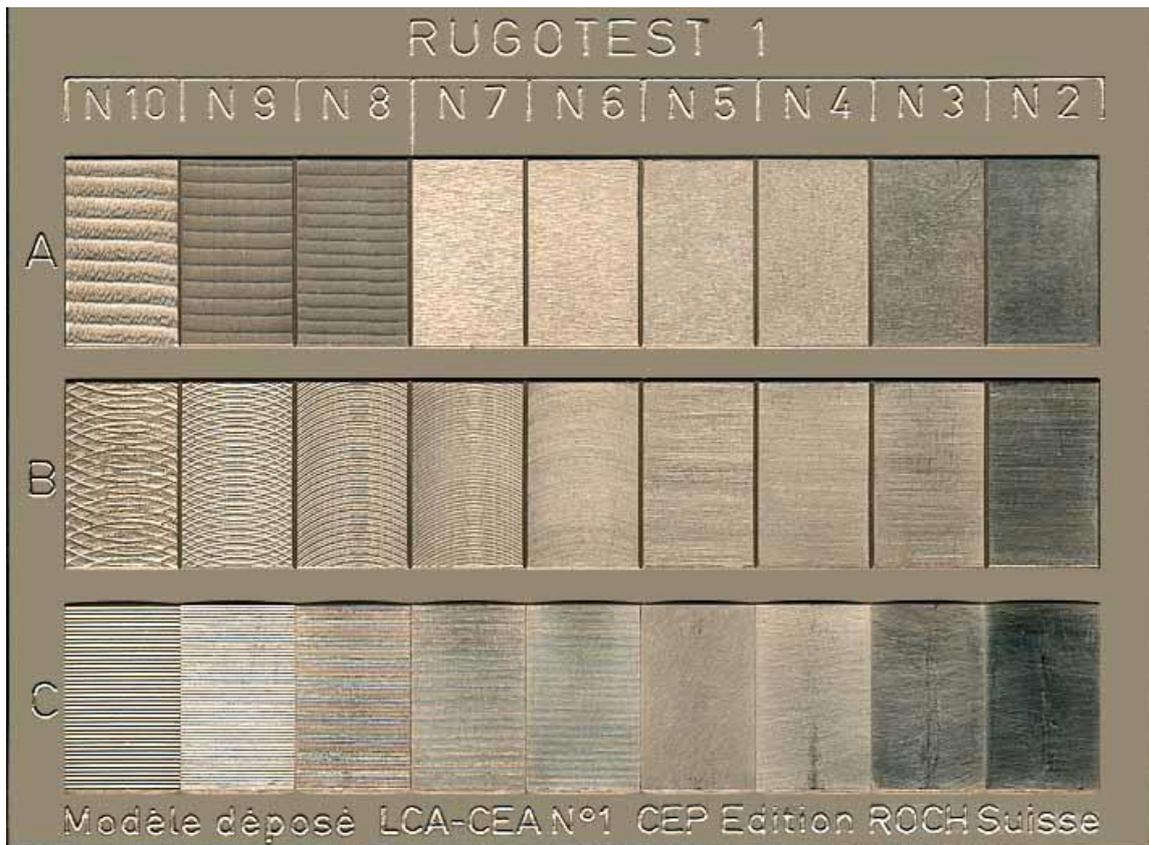
En el pasado el mejor método práctico para decidir si un acabado superficial cumplía con los requerimientos, era compararlo visualmente y mediante el tacto contra muestras con diferentes acabados superficiales.

El RugoTest se vé en la figura siguiente

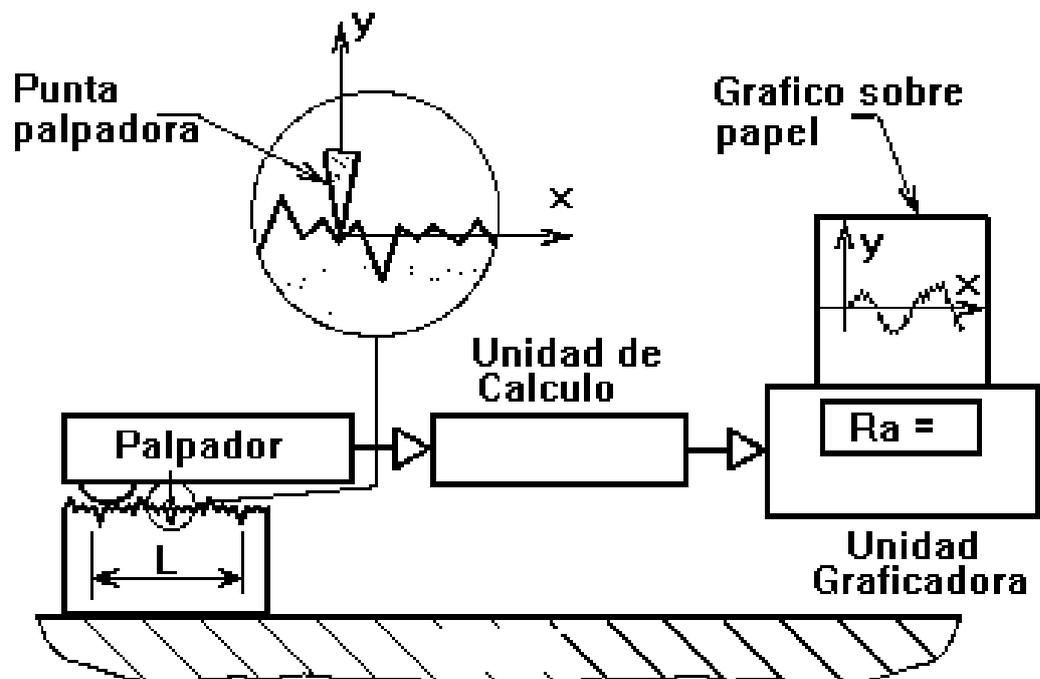
Ra	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	μm
CLA	1	2	4	8	16	32	63	125	μinch
RUBERT & COLTDA ENGLAND									
CLASE	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	
GRUPO		▲▲▲			▲▲		▲		

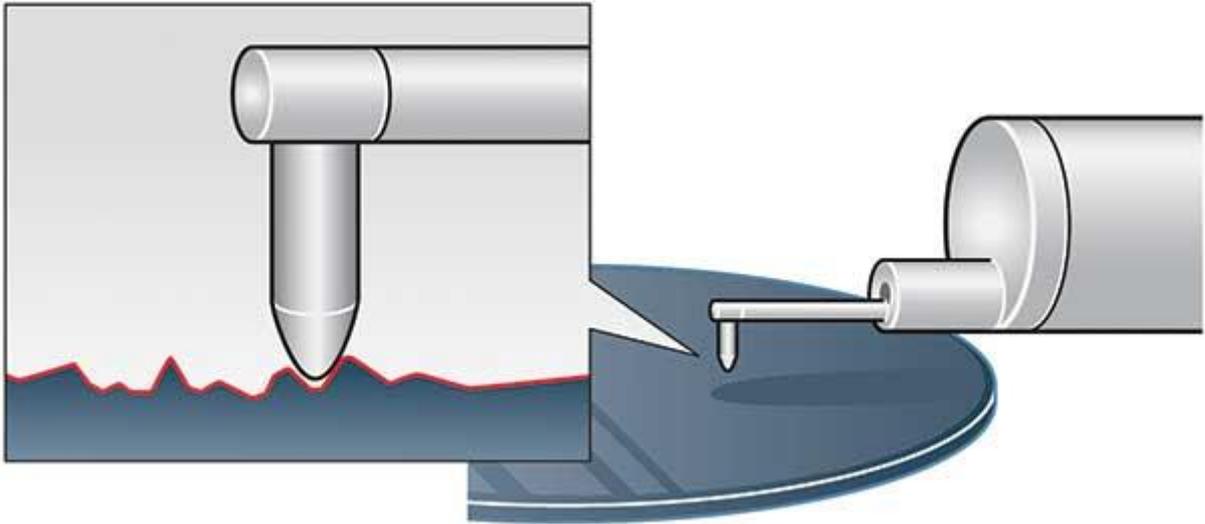
Este método no debe confundirse con los patrones de rugosidad que actualmente se usan en la calibración de rugosímetros electrónicos.

La desventaja de este modo de comparación táctil es que la decisión es subjetiva, y difícilmente dos personas estarán de acuerdo en que superficies son aceptables y cuales no, sobre todo si uno es comprador y el otro proveedor.



El avance de la Tecnología Electrónica durante el último cuarto de siglo ha hecho posible contar con rugosímetros.

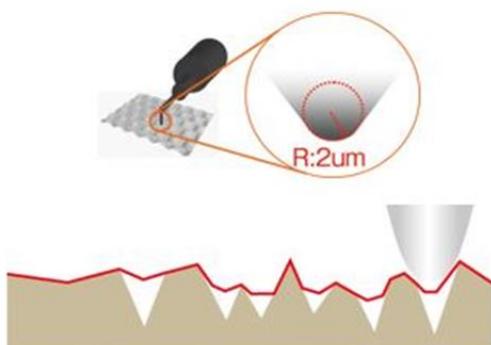




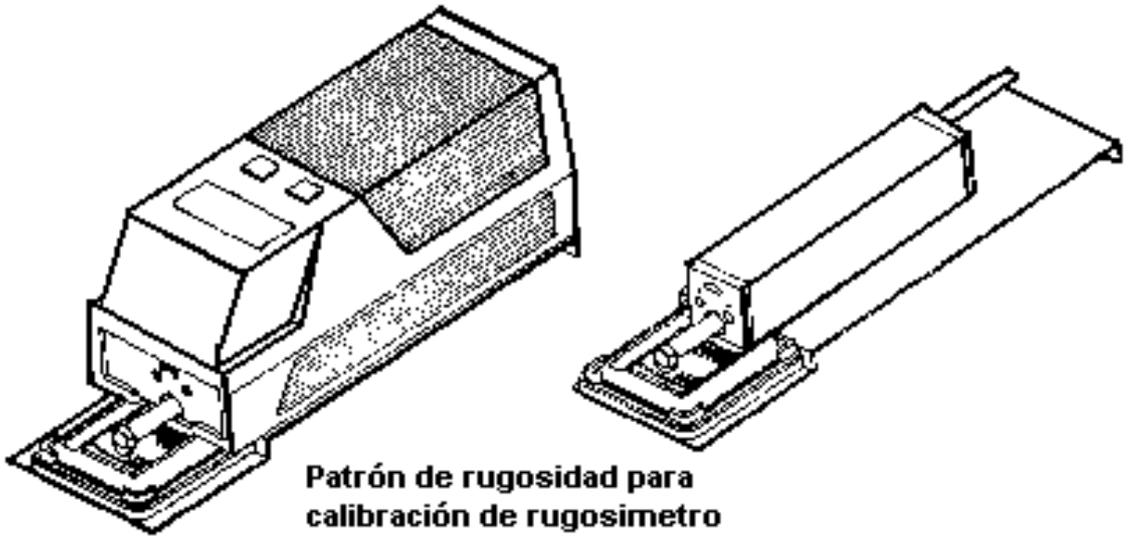
Estos instrumentos son fáciles de operar, portátiles, económicos, inmunes a las condiciones ambientales adversas del taller y proporcionan con rapidez los datos, incluso de registros e impresión de estos.

El método de medición de rugosidad más popular en la actualidad es el que se basa en un palpador de diamante con un radio en la punta de 2,5 a 10 μm que recorre una pequeña longitud, denominada longitud de muestreo (L_e), sobre la superficie analizada.

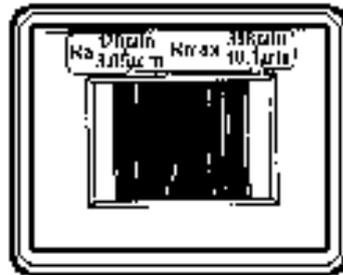
Los valores normalizados para esta longitud son 0,08 - 0,25 - 0,8 - 2,5 - 8 y 25 mm. Cuando se inspecciona rugosidad de una superficie mecanizada es suficiente con controlar solamente un sector de la misma puesto que en el resto la rugosidad tendrá valores similares.

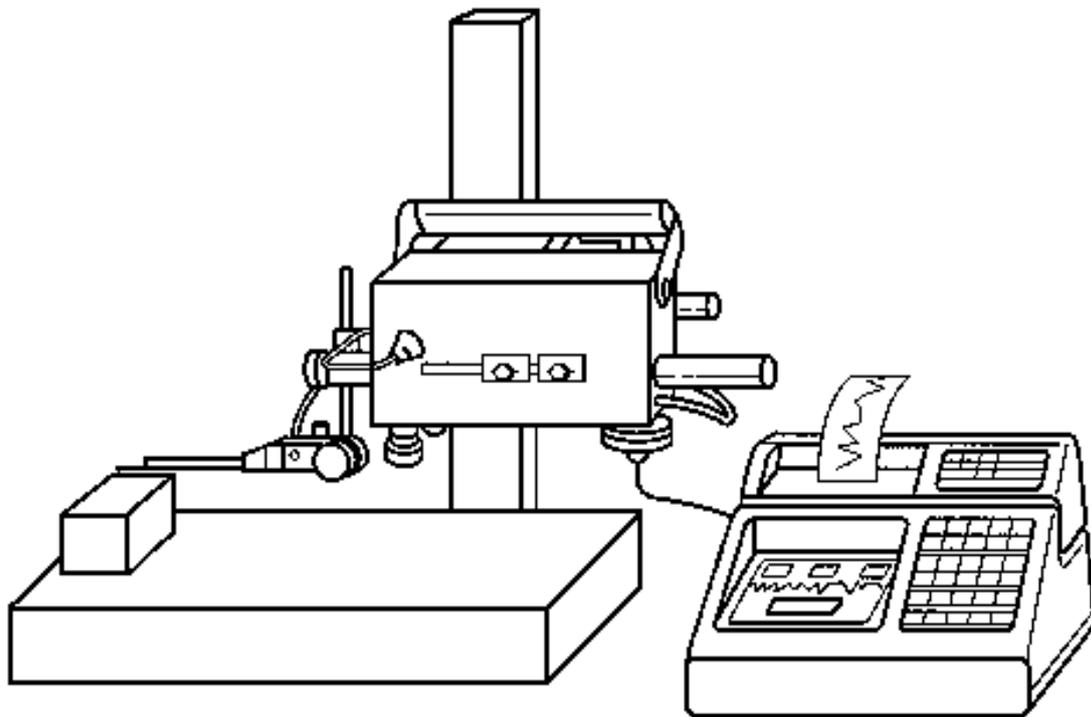


En las figuras siguientes vemos rugosímetros portátiles y un patrón de rugosidad y también uno de banco o de laboratorio.

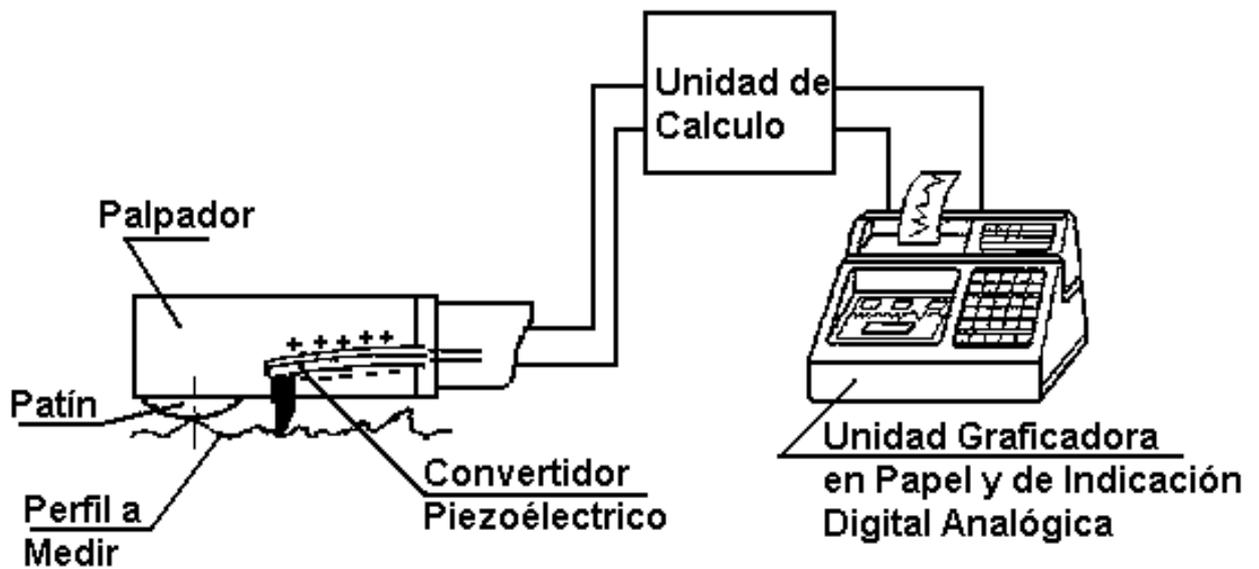


Patrón de rugosidad para
calibración de rugosímetro





Rugosímetros con el Principio Piezoeléctrico





El principio de funcionamiento de este rugosímetro se basa en los fenómenos piezoeléctricos. Un palpador con punta de diamante se desplaza a lo largo explorando una superficie, un convertidor piezoeléctrico (cristal de cuarzo) transforma las oscilaciones de la punta en una tensión alterna. Luego la unidad de cálculo envía la señal a otra unidad, donde podemos sacar el papel, en caso de ser necesario el papel de la curva de rugosidad o ver el valor de la misma ya sea en un indicador analógico o digital.

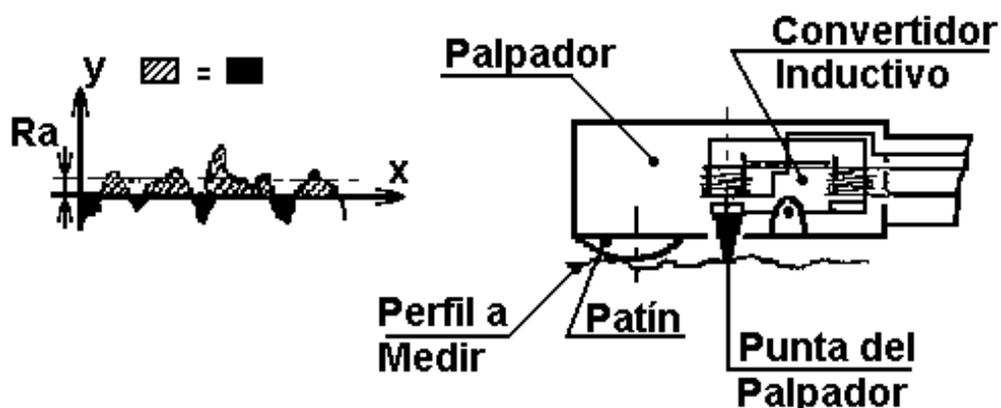
Los movimientos del palpador como consecuencia de su recorrido a lo largo del perfil, hacen oscilar el cristal dando origen a los fenómenos piezoeléctricos y por lo tanto a una tensión alterna.

En general las oscilaciones de la punta son pequeñísimas, del orden de $0,01 \mu\text{m}$ por lo que las tensiones generadas son de alrededor de 0.6 mV lo que exige amplificarlas y procesarlas en la unidad de cálculo; la señal; generada pasa luego a la unidad graficadora quién reproduce ampliando el perfil de la superficie que está reconociendo y lo imprime en un papel termosensible.

Rugosímetros con el principio de variación de inductancia y de capacitancia

Los rugosímetros de este tipo, en lugar de valerse de los fenómenos piezoeléctricos utilizan las variaciones de inductancia o de capacitancia del circuito analizador donde está acoplado convenientemente el palpador.

Un palpador con una punta de diamante de radio $2.5 \mu\text{m}$, explora la superficie a examinar con movimiento rectilíneo alternativo perpendicular a la dirección de orientación de la rugosidad, en una longitud seleccionada por el operador.



En el palpador; cuyo patín apoya en el perfil a medir; se encuentra la punta de diamante que sigue los salientes y entrantes de la superficie, provocando con este movimiento variaciones en la inductancia del circuito analizador y por consiguiente en la corriente que circula por el mismo.

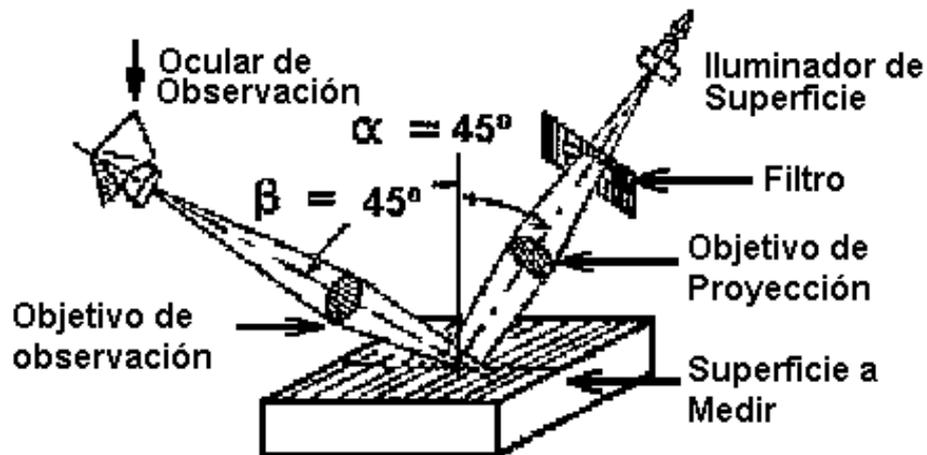


En general las oscilaciones de la punta son pequeñísimas, del orden de $0,01 \mu\text{m}$ por lo que las tensiones generadas son de pequeña cuantía; por lo que exige amplificarlas y procesarlas en la unidad de cálculo. La señal generada pasa luego a la unidad graficadora, quién reproduce ampliando el perfil de la superficie que está reconociendo y lo imprime en un papel termosensible. Tanto los rugosímetros de fenómeno piezoeléctrico, como los de inductancia necesitan periódicamente de un control, que se realiza con un patrón de rugosidad que es provisto por el fabricante; y en caso de ser necesario pueden llegarse a calibrar a los valores correspondientes.

Estos rugosímetros pueden; a través de una conexión RS-232; conectarse a una computadora, donde por medio de un Software específico se analizan los perfiles de rugosidad.

Rugosímetros Ópticos

Este tipo de rugosímetros es menos usado, y recurre al procesamiento óptico para la medición de R_t , altura total máxima entre picos más altos y valles más profundos. Y actualmente ha tomado envergadura en la medición de Rugosidad en 3D, usando el láser (Microscopía Laser en superficies).



A continuación se muestran tablas de valores de rugosidad logrados por los distintos métodos de mecanizado, como así también de la conversión del grado de rugosidad y la denominación o simbología usada por otros países.



Proceso	Rugosidad promedio Ra micrometros μm (micropulgadas μ pulg)												
	50 (2000)	25 (1000)	12.5 (500)	6.3 (250)	3.2 (125)	1.6 (63)	0.80 (32)	0.40 (16)	0.20 (8)	0.10 (4)	0.05 (2)	0.025 (1)	0.012 (0.5)
Corte con soplete													
Corte con cizalla													
Aserrado													
Cepillado, limado													
Taladrado													
Fresado químico													
Maq. descaga eléctrica													
Fresado													
Brochado													
Limado													
Haz electrónico													
Laser													
Electroquímico													
Taladrado, torneado													
Acabado de barril													
Rectificado electrolítico													
Bruñido con rodillo													
Rectificado													
Asentado													
Electropulido													
Pulido													
Lapeado													
Superacabado													
Limpiado con arena													
Rolado en caliente													
Forjado													
Fundición en molde permanente													
Fundición invertida													
Extrusión													
Rolado en frío, estirado													
Fundición a presión													

Los rangos mostrados arriba son típicos de los procesos listados. Valores mayores o menores pueden ser obtenidos bajo condiciones especiales.

Clave  aplicación promedio.  aplicación menos frecuente.

En la tabla de la pagina siguiente podemos observar una tabla de conversión de grados de Rugosidad.

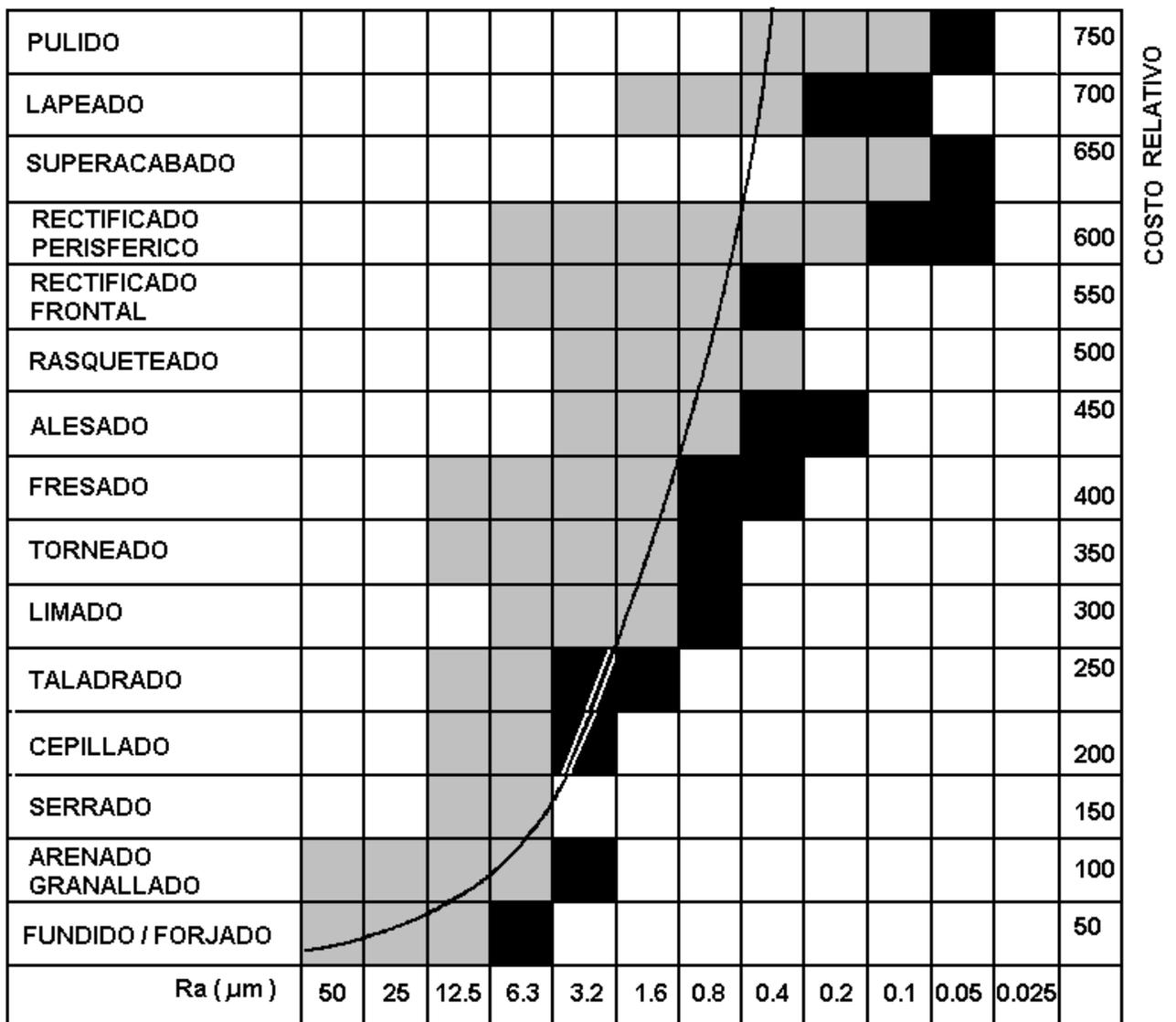


TABLA DE CONVERSION DEL GRADO DE RUGOSIDAD															
Equivalencia DIN	▽			▽▽			▽▽▽			▽▽▽▽					
Mecanizado	BASTO			MEDIO			FINO			SUPERFINO					
Examen de rugosidad	Por comparación al tacto y visual a base de muestras									Con aparatos de medición de superficies					
Suiza			N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1	
Francia				19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	
U.S.A			FT	FR	f0	FF	FG	FP							
Blaw Knox				f7	f6	f5	f4	f3	f2	f1p	f1				
Paises Escandinavos				50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1		
Rugosidad Ra (µm)			50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	
Rugosidad C.L.A (µ inch)			2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	
Italia (UNI)				12/▽	6/▽	3.2/▽	1.6/▽	0.8/▽	0.4/▽	0.2/▽					
Polonia			▽1	▽2	▽3	▽4	▽5	▽6	▽7	▽8	▽9	▽10	▽11	▽12	▽13

Costo de la Rugosidad

En el diagrama que se ilustra a continuación vemos como varía el costo de la producción con el grado de terminación superficial. Queda en claro que resulta imprescindible evitar requerir rugosidades menores de las necesarias para mantener los costos bajos.

Se muestra además los grados de acabado que se pueden conseguir con los métodos de fabricación más usuales.





UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**