

Docente di riferimento

Ing. Nicola Scuur

DIA

Dip. di Ingegneria ed Architettura

Università degli Studi di Trieste

nscuur@units.it

Motivazione allo studio

Perché si studiano?

- Influenza sulla resistenza all'usura
- Influenza sulla resistenza alla corrosione
- Influenza sulla resistenza a fatica
- Influenza sulla precisione dimensionale
- Influenza sul comportamento dei lubrificanti

L'adeguatezza di un prodotto meccanico alle condizioni di servizio è legata pertanto anche agli errori microgeometrici presenti sulle superfici funzionali.

Il grado di finitura superficiale delle diverse superfici va perciò definito in fase di progetto, tenendo presente anche il rapporto costi/benefici.

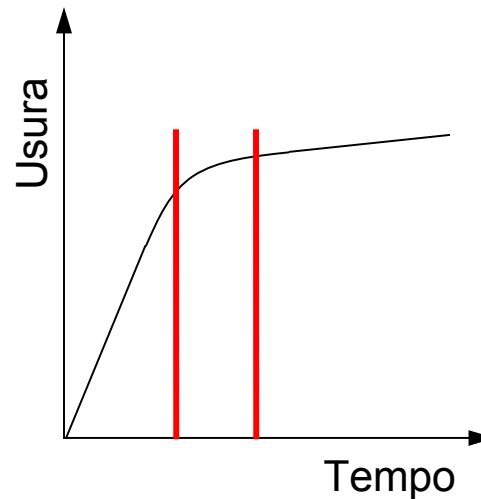
Resistenza all'usura

INFLUENZA SULLA RESISTENZA ALL'USURA

Il contatto tra due superfici avviene solo in alcune zone: si definisce il coefficiente di portanza K come:

$$K = \frac{\text{area di contatto effettiva}}{\text{area di contatto nominale}}$$

Si osservi il seguente diagramma di usura, di natura sperimentale:



Corrosione

La resistenza alla corrosione a umido è generalmente maggiore nei materiali che presentano bassi valori della rugosità superficiale. Il motivo può essere chiarito con un esempio:

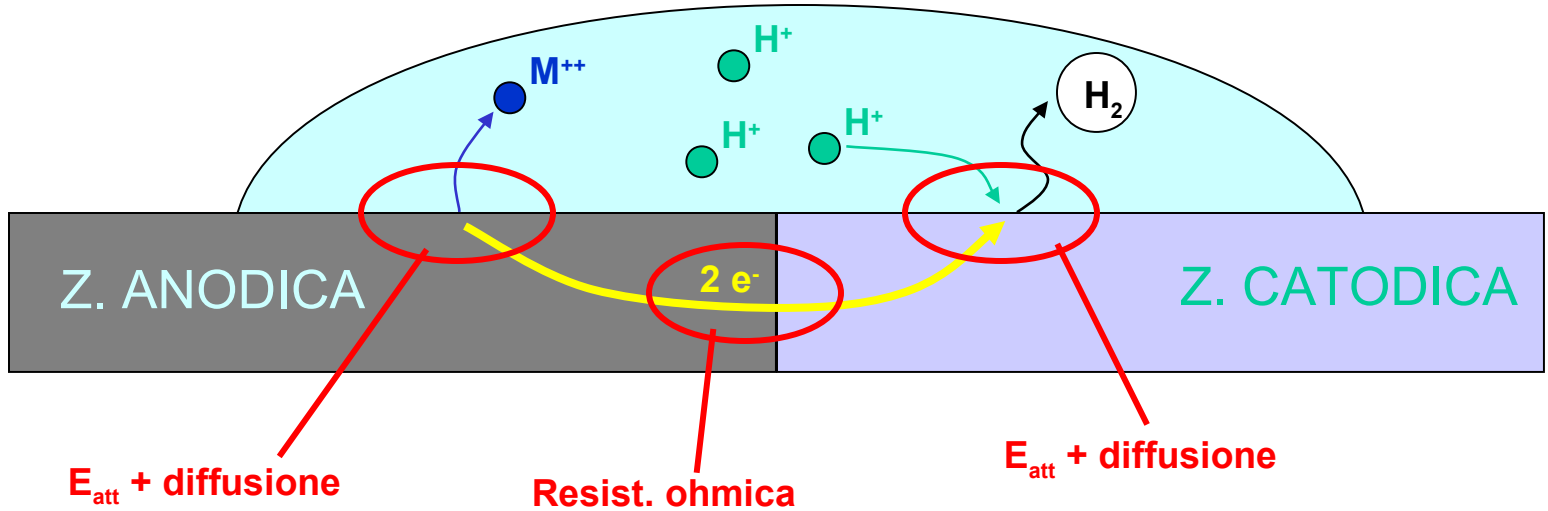
Nella corrosione generalizzata, sulla superficie metallica avvengono fenomeni redox, la cui cinetica è caratterizzata da una densità di corrente i_{corr} [A/m²].

La perdita di peso per unità di area nominale A_0 sarà data da:

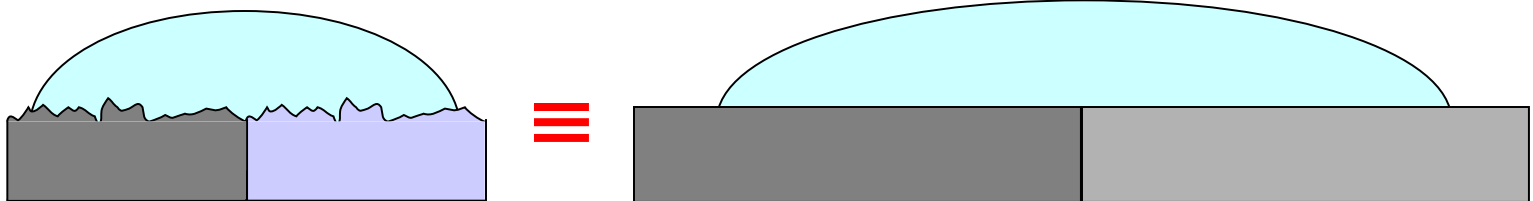
$$\Delta w = \frac{i_{corr} \cdot A_0 \cdot t \cdot M \cdot k_a}{n \cdot F}$$

Δw	perdita di peso specifica [g/m ²]
k_a	rapporto tra area reale ed A_0; può essere $\gg 1$
i_{corr}	densità di corrente (dipende dal sistema metallo/elettrolita) [A/m ²]
t	tempo [s]
M	massa atomica del metallo [g/mol]
n	numero di elettroni implicati nel processo redox
F	costante di Faraday = 96500 [C/mole] = [A·s/mol]

Corrosione



- $E_{att} \rightarrow$ sovrapotenziale di scarica
- Diffusione \rightarrow polarizzazione



Fatica

Il cedimento strutturale nei materiali metallici (tanaci!) può avvenire per sovraccarico o per fatica.

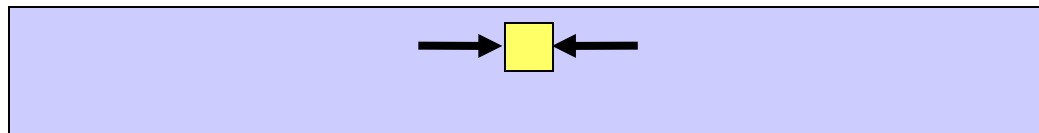
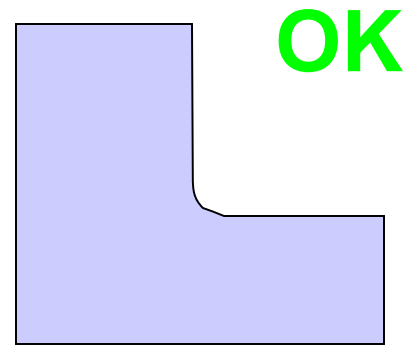
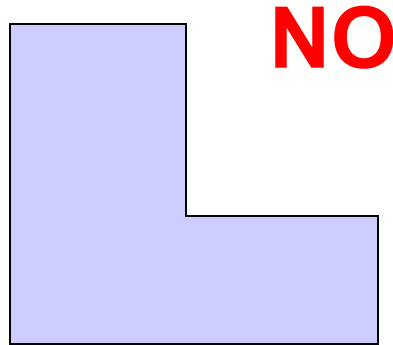
La verifica di un componente soggetto a carichi ciclici va effettuata secondo i criteri tradizionali (σ_y + coeff. di sicurezza), ma anche tenendo presenti i fenomeni di fatica.

Uno dei parametri a disposizione del progettista è il grado di finitura superficiale. Infatti la durata della fase I di sviluppo del danno di fatica, detta anche fase di innesco può essere notevolmente ridotta –e talvolta annullata- dalla presenza di difetti microgeometrici. Questo fatto è particolarmente importante qualora non si adotti il concetto di progettazione “in presenza di difetti” (es.: settore aeronautico) o quando il componente non sia sostituibile (es.: settore biomedico). In questi casi, generalmente, non vi è una sostituzione programmata dei componenti soggetti a fatica e quindi l’atteggiamento progettuale è quello di adottare gli accorgimenti utili affinché la vita del componente sia maggiore di quella della macchina in cui è installato (es.: componenti per m.c.i. ad uso automobilistico).

Fatica

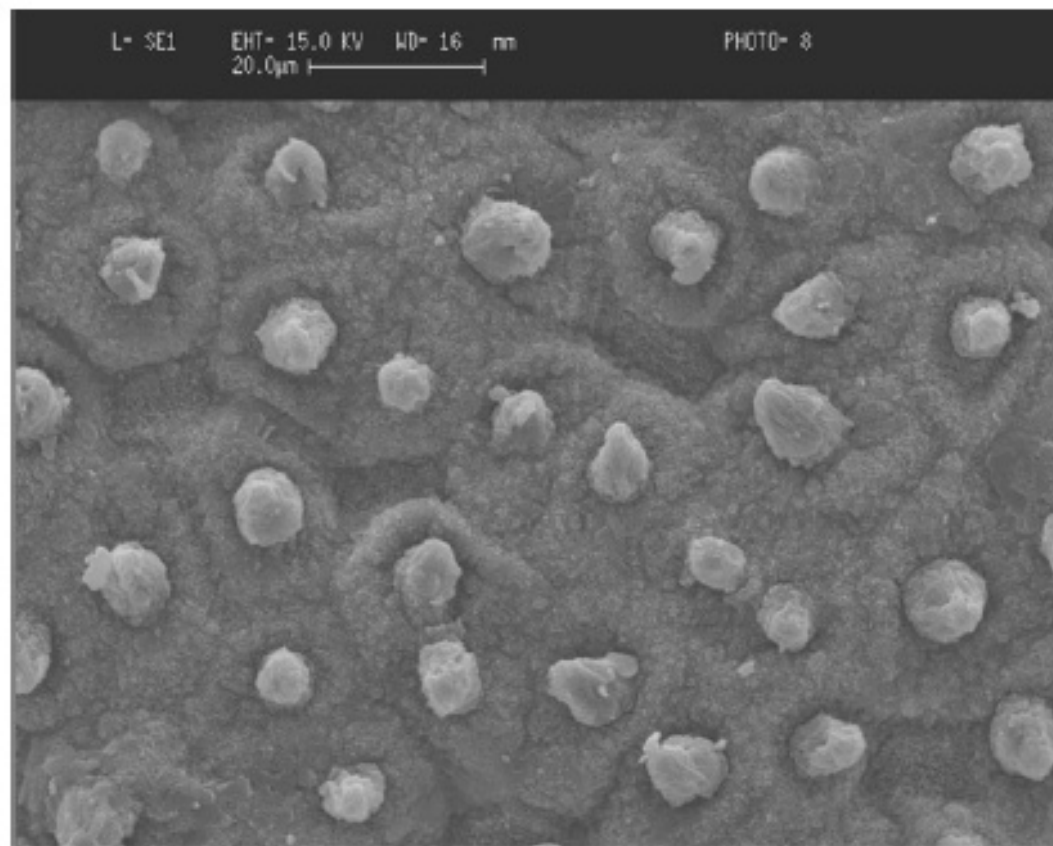
Altri possibili interventi

- Geometria
- Trattamenti superficiali (pallinatura, cementazione, ecc.)
- Protezione dagli agenti corrosivi



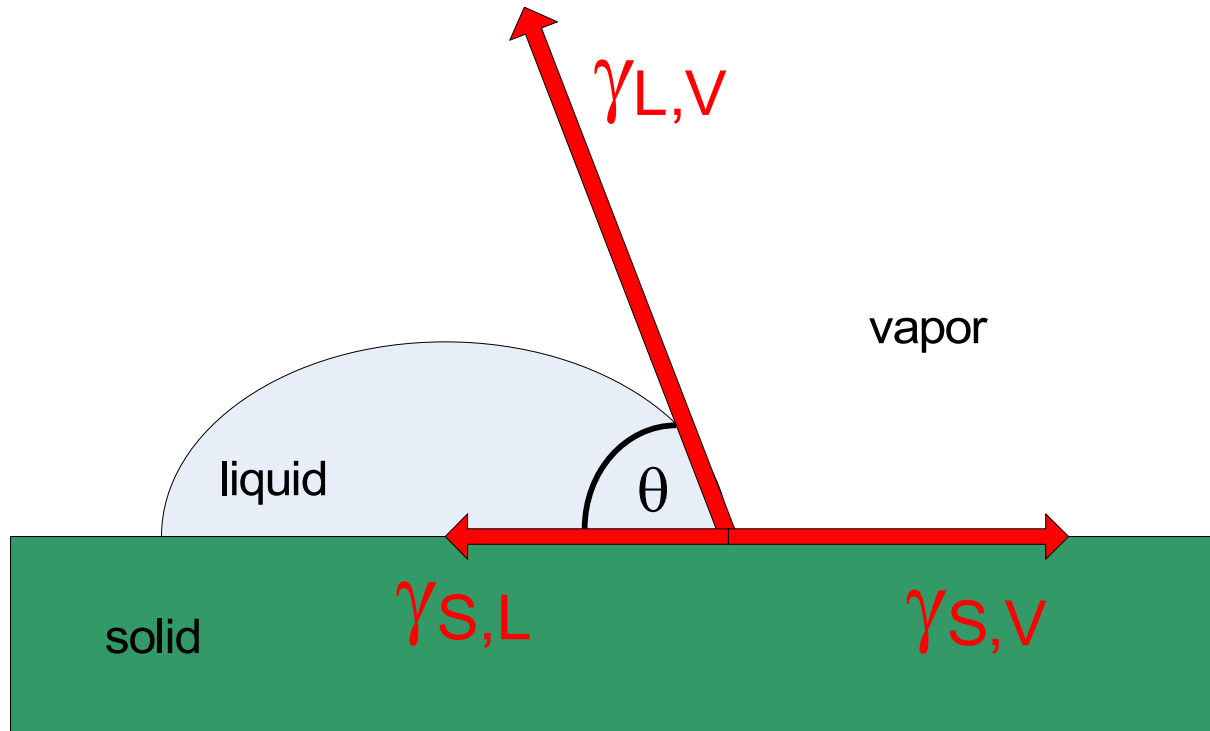
Altro

Lotus effect



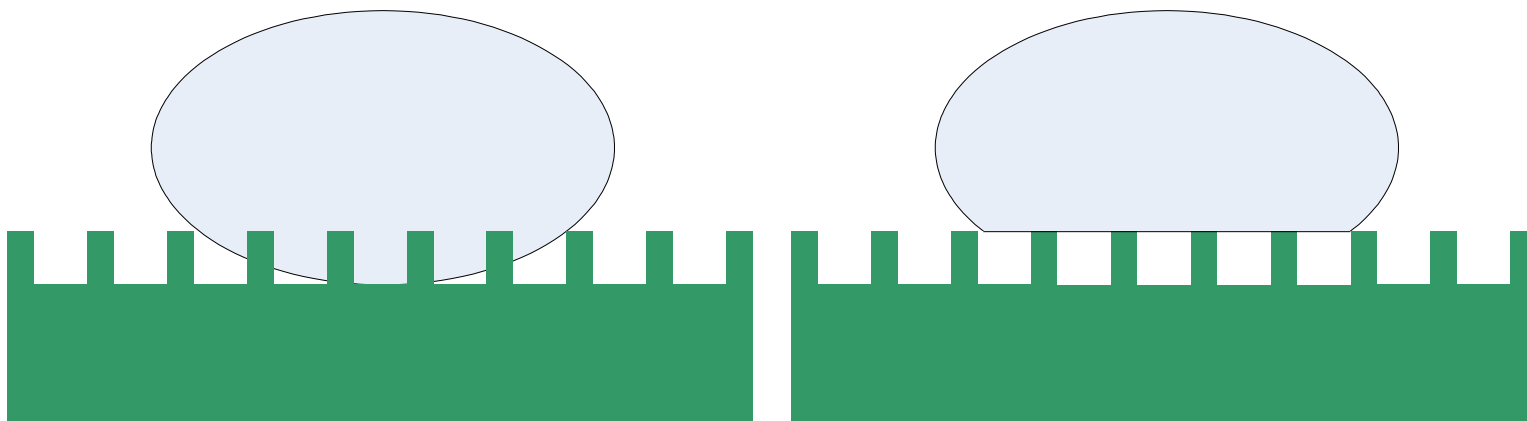
Altro

Lotus effect



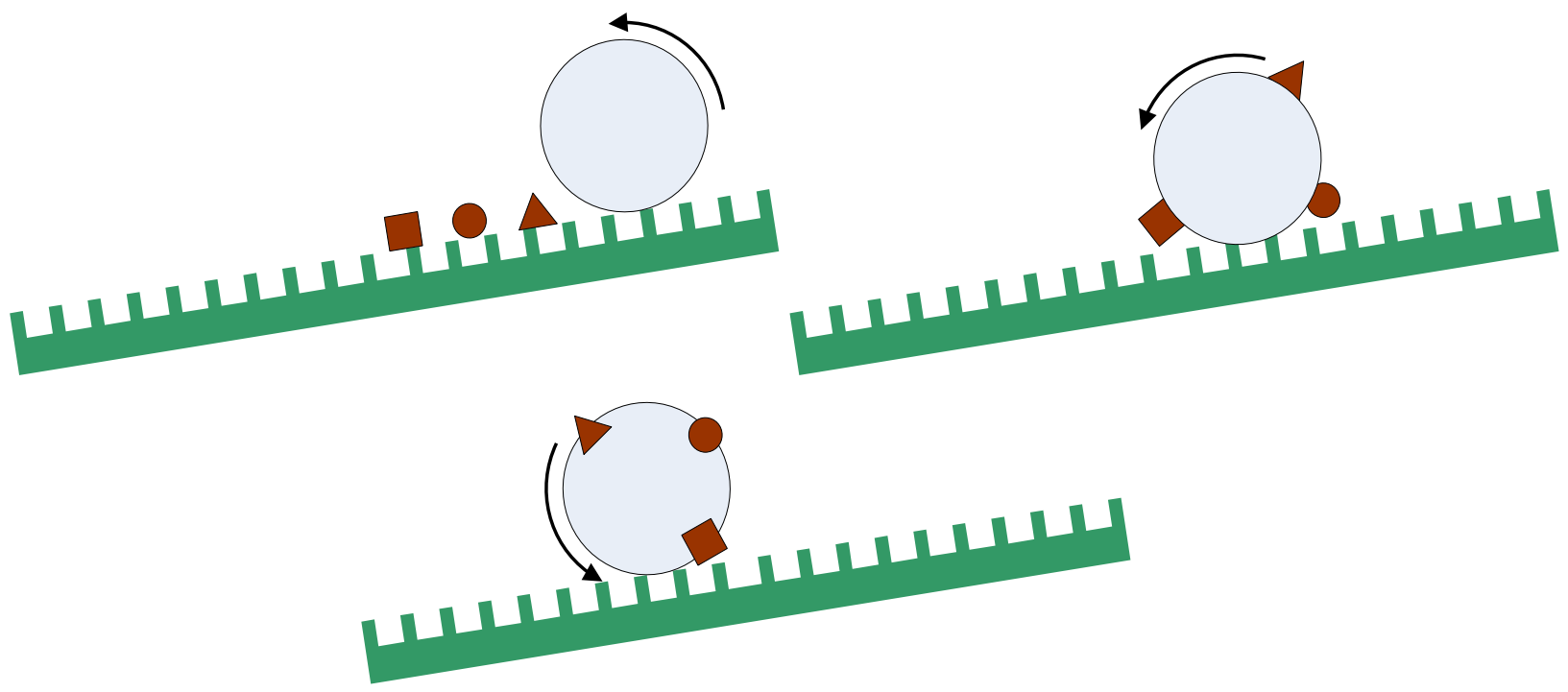
Altro

Lotus effect



Altro

Lotus effect

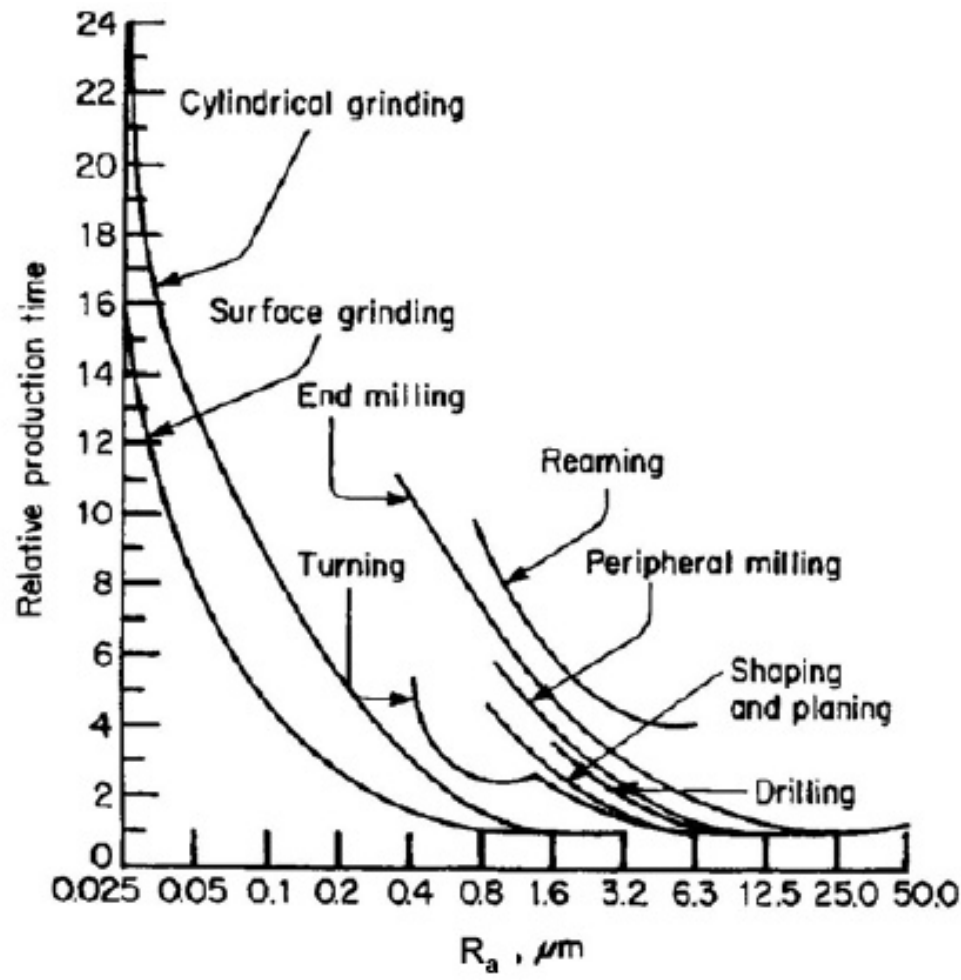


Altro

Lotus effect



Costi



Definizioni

Tipi di superfici

Superficie

La superficie di un corpo è il confine di separazione dello stesso da altri oggetti o sostanze

Superficie nominale

La superficie nominale è quella che si desidera il corpo posseda, escludendo l'eventuale voluta rugosità. La forma e le dimensioni della superficie nominale sono descritte e quotate nei disegni tecnici.

Superficie reale

La superficie reale è quella effettiva di un corpo. Essa differisce da quella nominale a causa del processo che l'ha creata, delle proprietà, della composizione e della struttura del materiale costituente il corpo.

Definizioni

Superficie misurata

Una superficie misurata è una rappresentazione della superficie reale ottenuta mediante un qualche strumento di misura. E' necessario fare questa distinzione a causa degli errori introdotti durante l'esecuzione della misura.

Geometria delle superficie

Lo studio della geometria delle superfici, della quotatura e delle tolleranze fanno parte della metrologia. Tuttavia lo studio della rugosità superficiale si avvale spesso di concetti propri di questa disciplina, che pertanto è utile richiamare.

Forma

La forma di un oggetto è la descrizione delle sue superfici nominali.

Dimensione

Le dimensioni di un oggetto sono le misure che determinano la sua estensione nello spazio tridimensionale (si distinguono dimensioni nominali, dimensioni reali, dimensioni misurate)

Definizioni

Tolleranza

Intervallo ammissibile per una dimensione reale di un oggetto, specificato in modo tale che esso possa assolvere al proprio scopo in modo adeguato.

Imperfezioni delle superfici

Errore di forma

Gli errori di forma comprendono le deviazioni a grande lunghezza d'onda dalla superficie nominale corrispondente. Essi derivano da problemi nel processo produttivo quali, ad esempio, inaccuratezza delle guide e dei mandrini nelle macchine utensili, bloccaggio inadeguato dei pezzi, disallineamento dei pezzi in lavorazione, usura degli equipaggiamenti.

Texture

Con il termine texture si intendono le deviazioni dalla superficie nominale di piccola lunghezza d'onda, che si è soliti suddividere in ondulazioni e rugosità propriamente detta e la giacitura di tali imperfezioni.

Definizioni

Ondulazione

L'ondulazione include le deviazioni dalla superficie reale di lunghezza d'onda intermedia tra quella caratteristica degli errori di forma e quella della rugosità. Si noti che, in pratica, raramente si distingue tra errore di forma e ondulazione, né vi sono criteri chiari sul come effettuare questa suddivisione. Stanno tuttavia prendendo piede alcune norme che definiscono questa distinzione in modo chiaro e rigoroso.

Rugosità

La rugosità include le irregolarità di una superficie di lunghezza d'onda più piccola. Le sue caratteristiche sono legate al processo produttivo ed al materiale lavorato.

Giacitura

La giacitura è la direzione predominante della texture. Essa è determinata essenzialmente dal processo produttivo: ad esempio lavorazioni di tornitura, foratura, rettifica producono superfici con texture di giacitura ben definita, mentre colata e sabbiatura no.

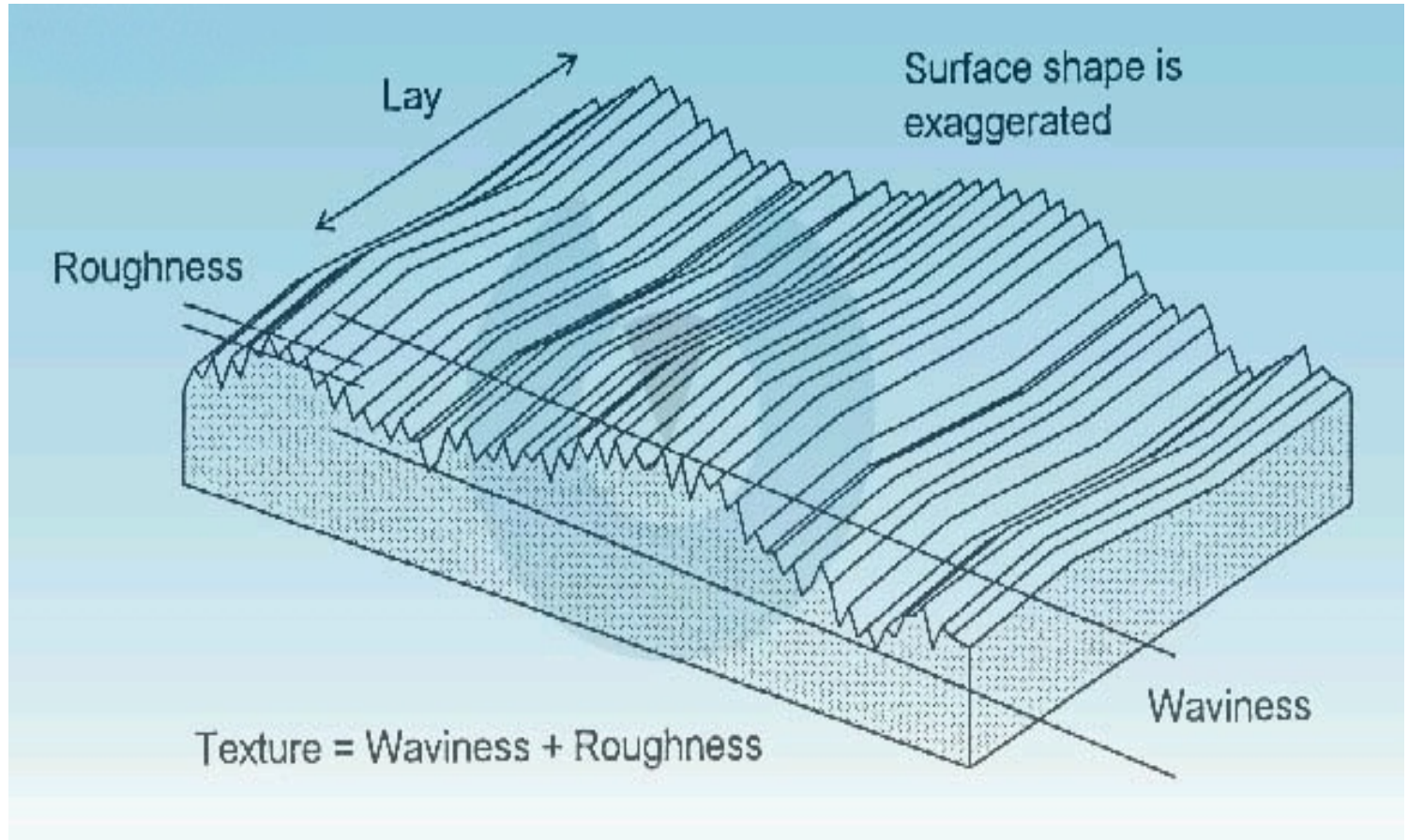
Definizioni

La giacitura ha notevole importanza per le proprietà ottiche di una superficie: una giacitura notevolmente strutturata può far apparire rugose superfici che lo sono relativamente poco.

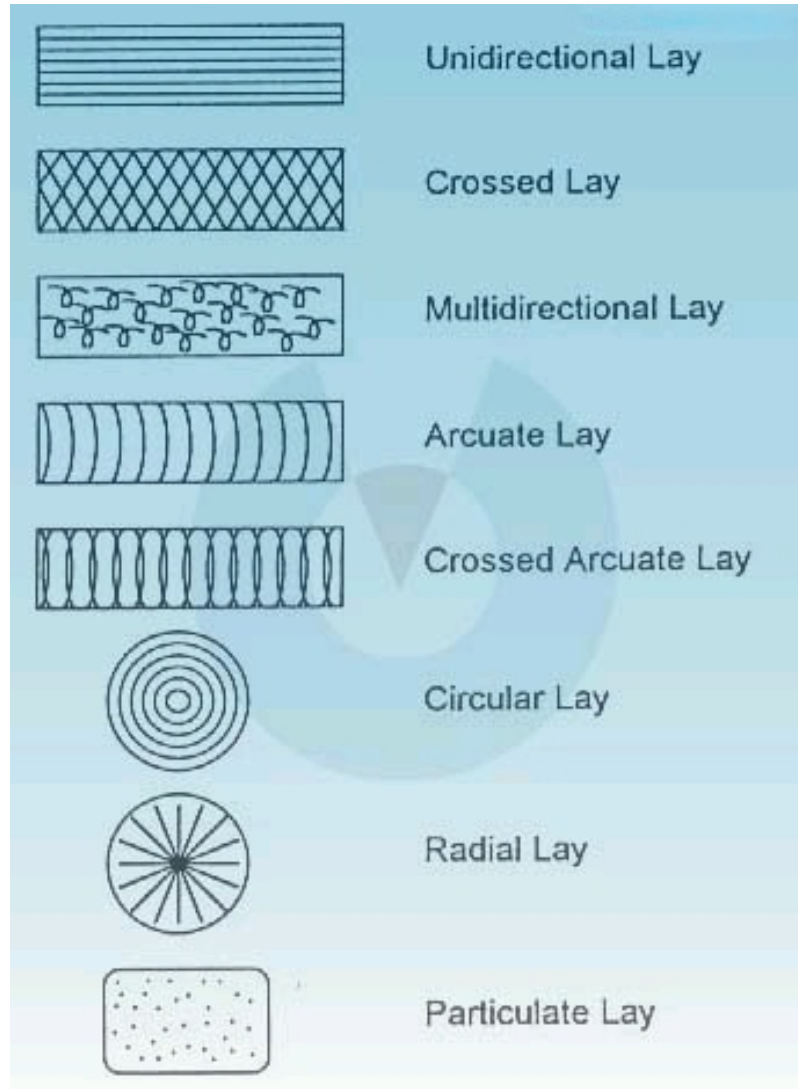
Altri difetti

I difetti descritti non comprendono graffi, scalfitture, pits, crateri ed altri difetti individuali, non voluti e non usuali, la cui tollerabilità nel rapporto tra fornitore ed acquirente di un determinato componente è regolata da apposite norme o da accordi.

Tessitura



Giacitura



Profili

Geometria delle superficie

Lo studio della geometria delle superfici, della quotatura e delle tolleranze fanno parte della metrologia. Tuttavia lo studio della rugosità superficiale si avvale spesso di concetti propri di questa disciplina, che pertanto è utile richiamare.

Forma

La forma di un oggetto è la descrizione delle sue superfici nominali.

Dimensione

Le dimensioni di un oggetto sono le misure che determinano la sua estensione nello spazio tridimensionale (si distinguono dimensioni nominali, dimensioni reali, dimensioni misurate)

Profili

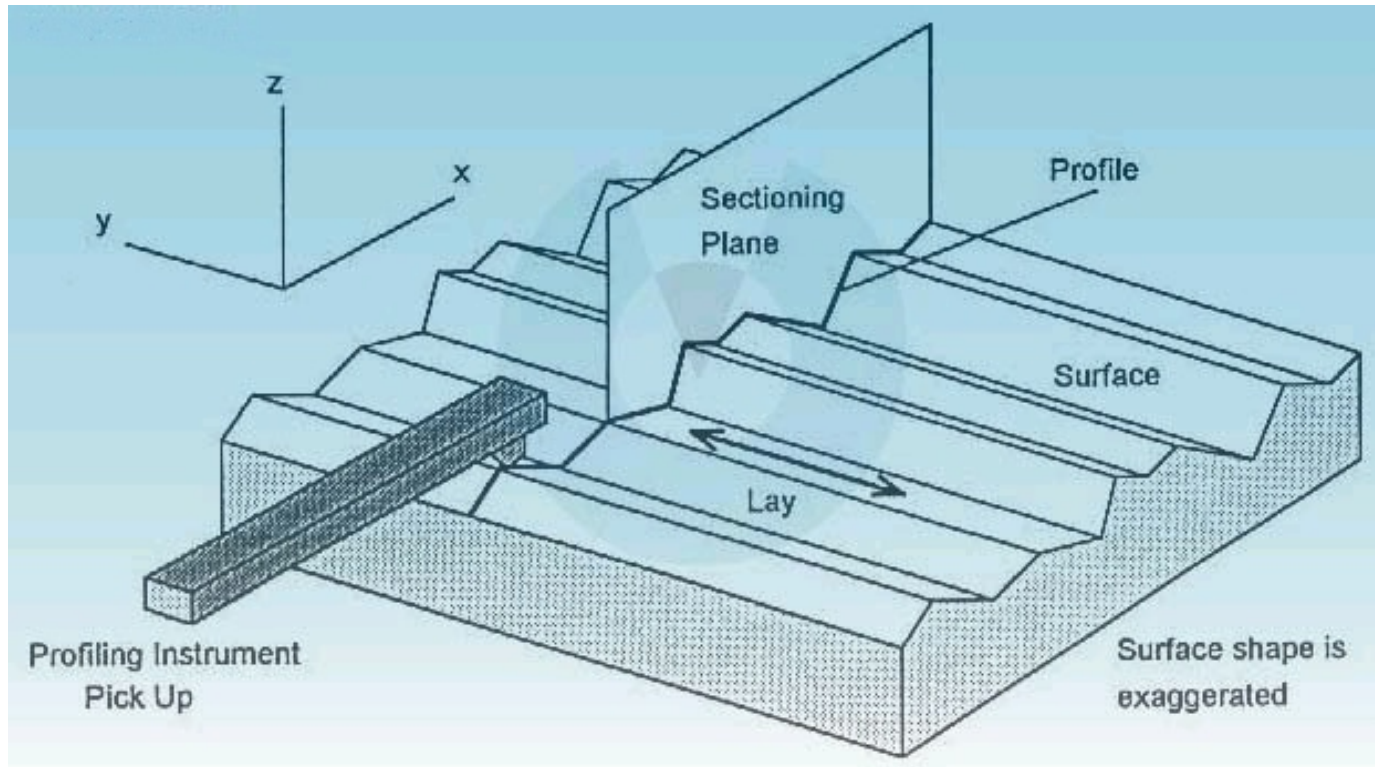
Profilo

Un profilo è la linea di intersezione tra una superficie ed un piano, il quale viene normalmente scelto perpendicolare alla superficie stessa ed alla giacitura della rugosità.

Profili

Si distinguono: profilo nominale, reale e misurato.

Quest'ultimo differisce da quello reale a causa degli errori non intenzionali introdotti dagli strumenti di misura.



Profili

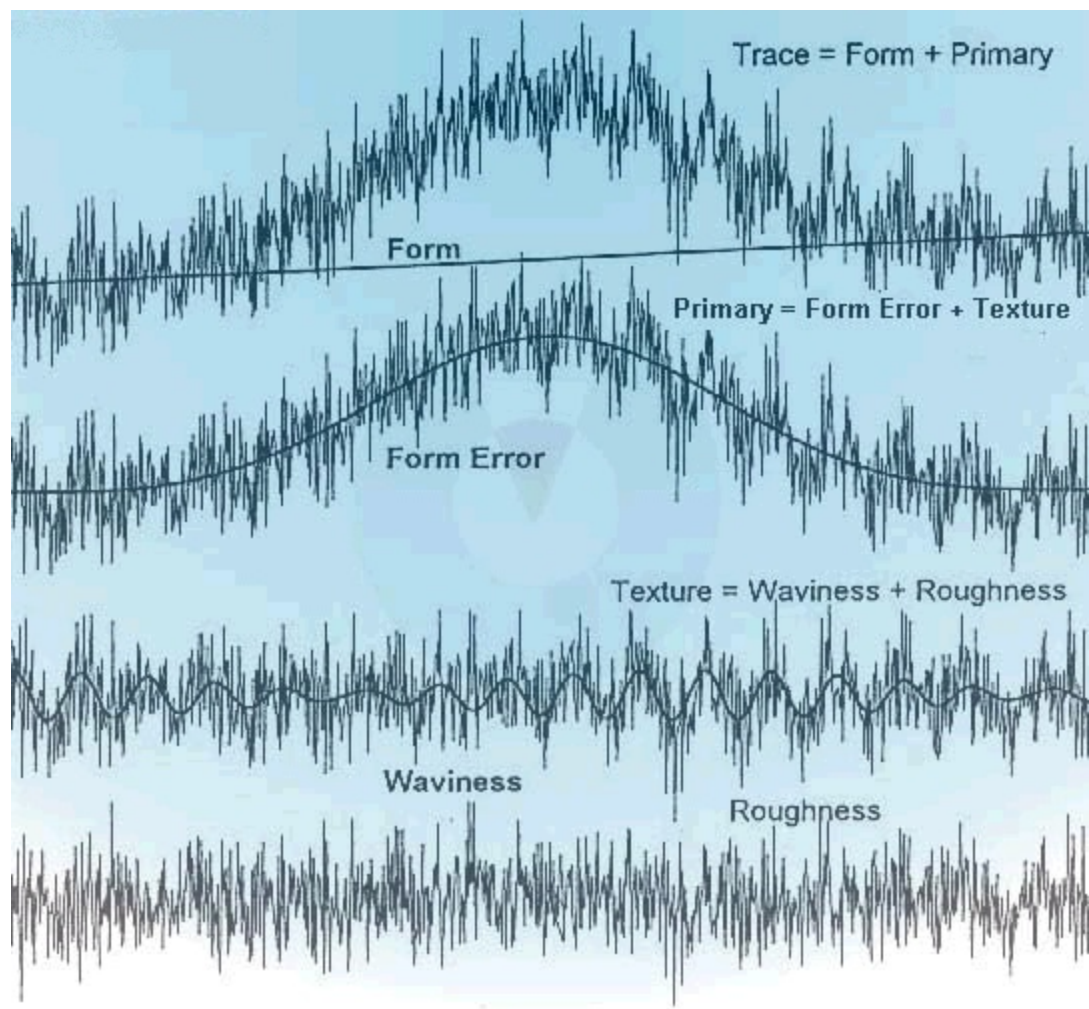
Profilo modificato

Un profilo modificato è un profilo misurato il quale è stato sottoposto a filtraggio meccanico, elettrico, ottico o digitale. Tale operazione viene eseguita per eliminare o minimizzare alcune caratteristiche della superficie ed introdotte dallo strumento di misura ed enfatizzarne altre. L'errore introdotto è, in questo caso, intenzionale ed i dettagli della modificazione sono impostabili dall'operatore come parte integrante delle operazioni di misura.

Un filtro (ai fini della valutazione dei difetti microgeometrici) trasforma un profilo misurato in modo tale attenuare le componenti in frequenza al di fuori dell'intervallo di interesse.

Nell'analisi degli errori microgeometrici interessano generalmente le componenti a lunghezza d'onda medio-piccola. Talvolta le componenti di lunghezza d'onda piccolissima vengono scartate in quanto vengono considerate rumore di fondo.

Profili



Rugosità

Profilo di rugosità

E' quello che comprende le sole componenti a lunghezza d'onda minore (avendo eliminato quindi, dal profilo misurato, la componente di forma e quella di ondulazione secondo un certo criterio). Opzionalmente, come già detto, si provvede a filtrare le componenti a lunghezza d'onda piccolissima per attenuare gli effetti del rumore.

La conoscenza e caratterizzazione di tale profilo è fondamentale ai fini tecnologici ed industriali in quanto consente di prevedere il comportamento di un componente nei confronti, ad esempio, del contatto con altre parti (attrito, usura), dell'aspetto (visivo e tattile), della possibilità di effettuare trattamenti superficiali (verniciature, incollaggi, deposizioni CVD e PVD).

Filtraggio

Eliminazione delle componenti di forma ed ondulazione

Può essere eseguita con vari metodi:

Meccanico (es: pattino strisciante): è un metodo che veniva utilizzato molto in passato. Elimina automaticamente l'errore di allineamento –in realtà evita l'uso di un piano di riferimento esterno- e quello di forma.

Elettrico: è costituito dalla serie di filtri (passa-alto) che vengono utilizzati per eliminare le componenti a lunghezza d'onda indesiderate. Il valore della frequenza di taglio è prescritto dalle norme in modo tale da eliminare le componenti dell'errore di forma e di ondulazione.

Matematico: si applica ai dati grezzi digitalizzati ottenuti solitamente con apparecchiature dotate di piano di riferimento esterno per eliminare l'errore di allineamento (es.: metodo dei minimi quadrati) e tutte le altre componenti d'errore (filtri digitali, DSP).

Linea media

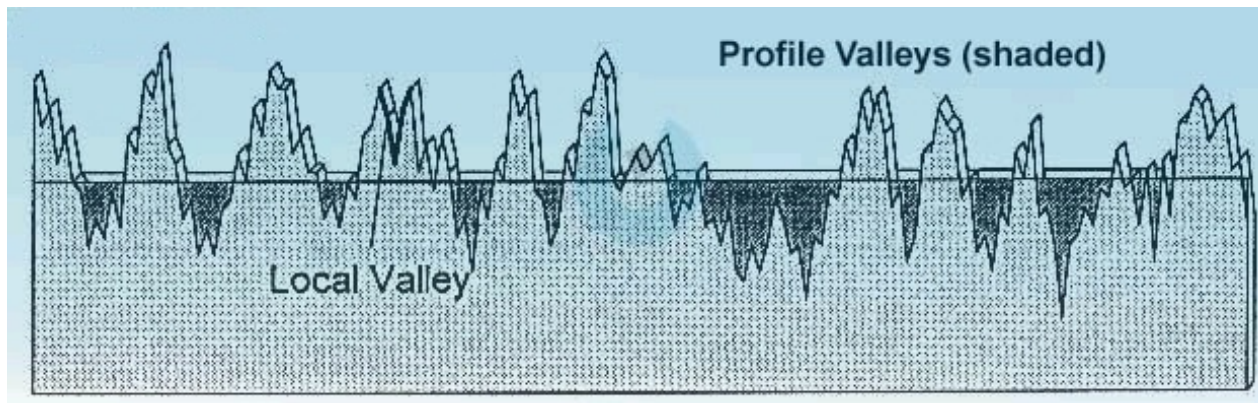
Linea media del profilo

Ottenuto un profilo di rugosità, le valutazioni successive vengono effettuate utilizzando come riferimento la **linea media**, ovvero quella che, nel tratto considerato, suddivide il profilo in due parti la cui area compresa tra tale linea e quella del profilo siano identiche.

Rispetto a tale linea vengono definiti picchi e valli del profilo come descritto nelle figure seguenti.

Si osservi l'esistenza di picchi e valli locali, da distinguersi da picchi e valli del profilo.

Picchi e valli

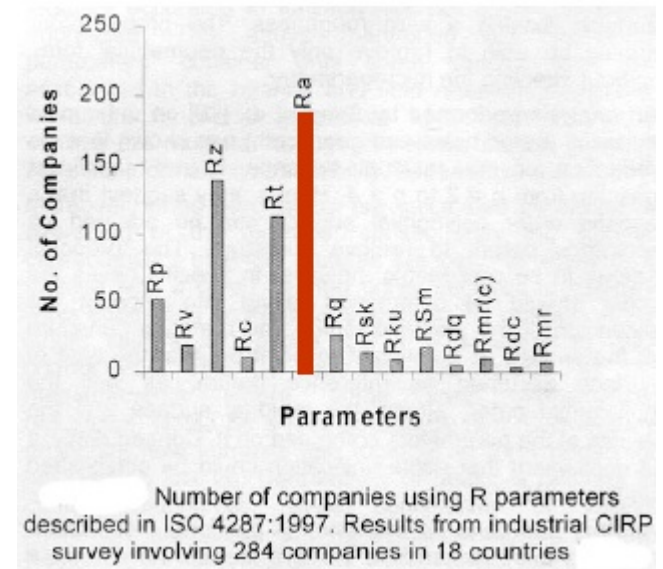


Parametri di rugosità

Parametri di rugosità

I parametri “R” descrivono la deviazione verticale di un profilo di rugosità rispetto ad un riferimento (linea media).

PARAMETER	DESCRIPTION	STANDARD
R_a	Roughness average	ISO 4287, BS 1134, ANSI B46.1, DIN 4768
R_z (DIN)	Mean peak-to-valley height	DIN 4786
R_z (ISO)	Ten point height	ISO 4287, BS 1134, DIN 4768
R_t	Maximum peak-to-valley height	DIN 4768
R_y	Maximum roughness depth	ISO 4287, BS 1134, DIN 4768
R_q	RMS roughness average	ISO 4287, DIN 4768
R_p	Maximum peak height	DIN 4762
S_k	Skewness	ISO 4287, DIN 4768
K_u	Kurtosis	



Parametri di rugosità

Parametri di rugosità

R_a

E' il parametro più noto ed utilizzato in campo industriale e rappresenta l'area tra la linea media ed il profilo di rugosità.

Matematicamente è definito come:

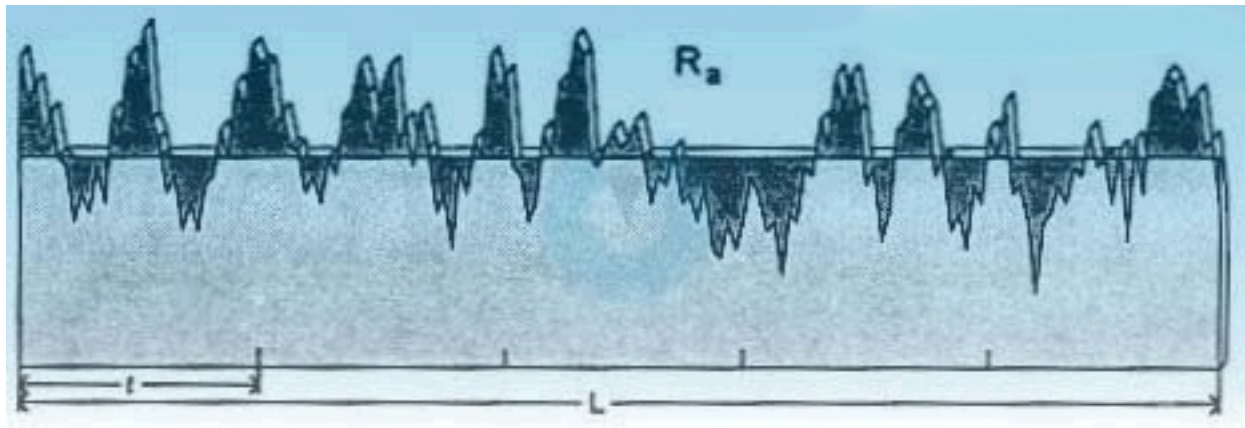
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |r(x)| dx$$

Se il calcolo viene effettuato a partire da dati digitali, utilizzando la regola del trapezio per approssimare l'integrale, si ha:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |r_i|$$

Cut-off

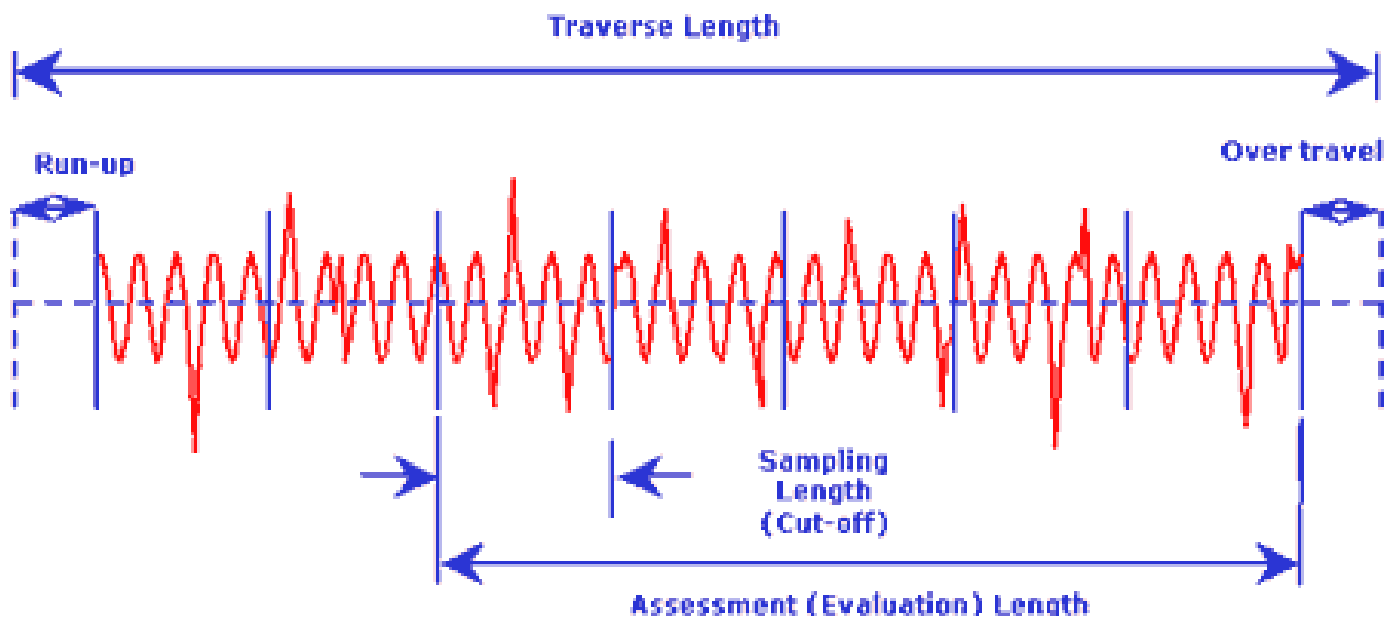
Normalmente un tratto di misura è costituito da una lunghezza di campionamento pari a cinque volte la lunghezza di cut-off. L' R_a risultante è quello relativo a tutto il tratto di misura.



L lunghezza di valutazione
t lunghezza di cutoff

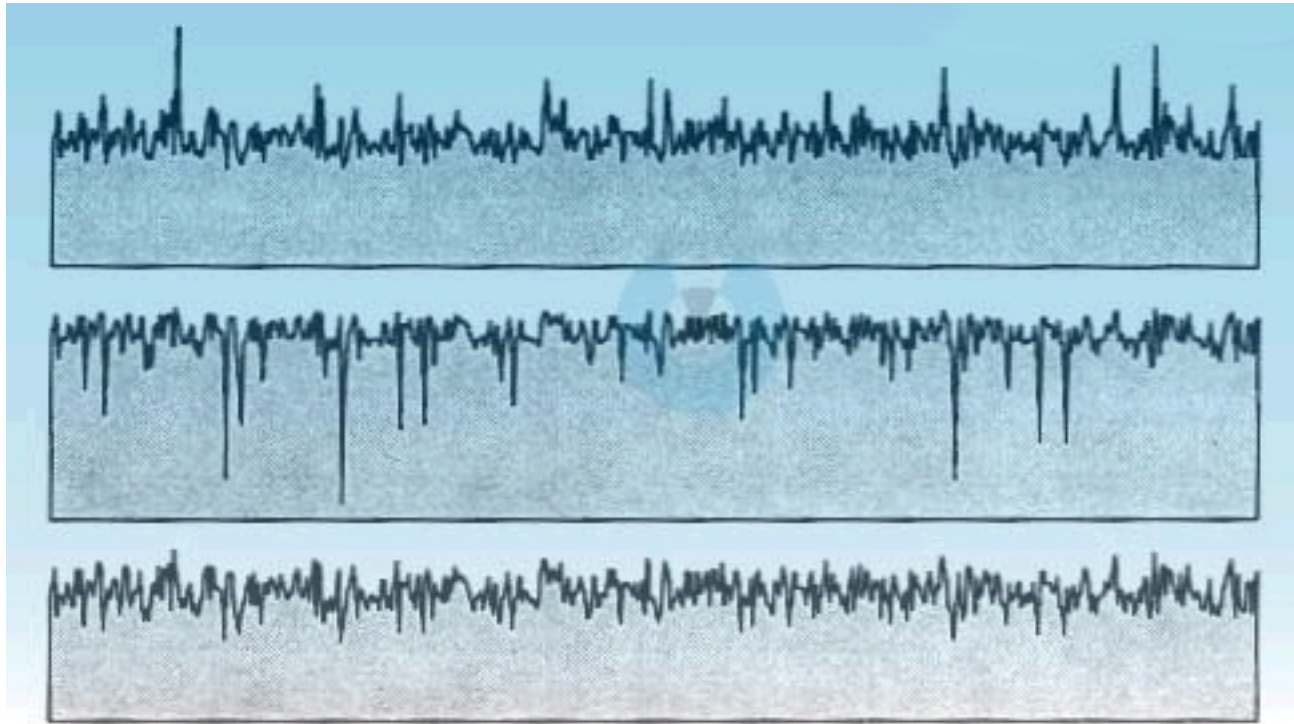
- La lunghezza di cut-off dovrebbe essere pari ad almeno 2.5 volte la distanza picco-valle (almeno 2 picchi e due valli in una lunghezza di cut-off).
- Il cut-off più utilizzato è 0.8 mm.

Cut-off



R_a : critica

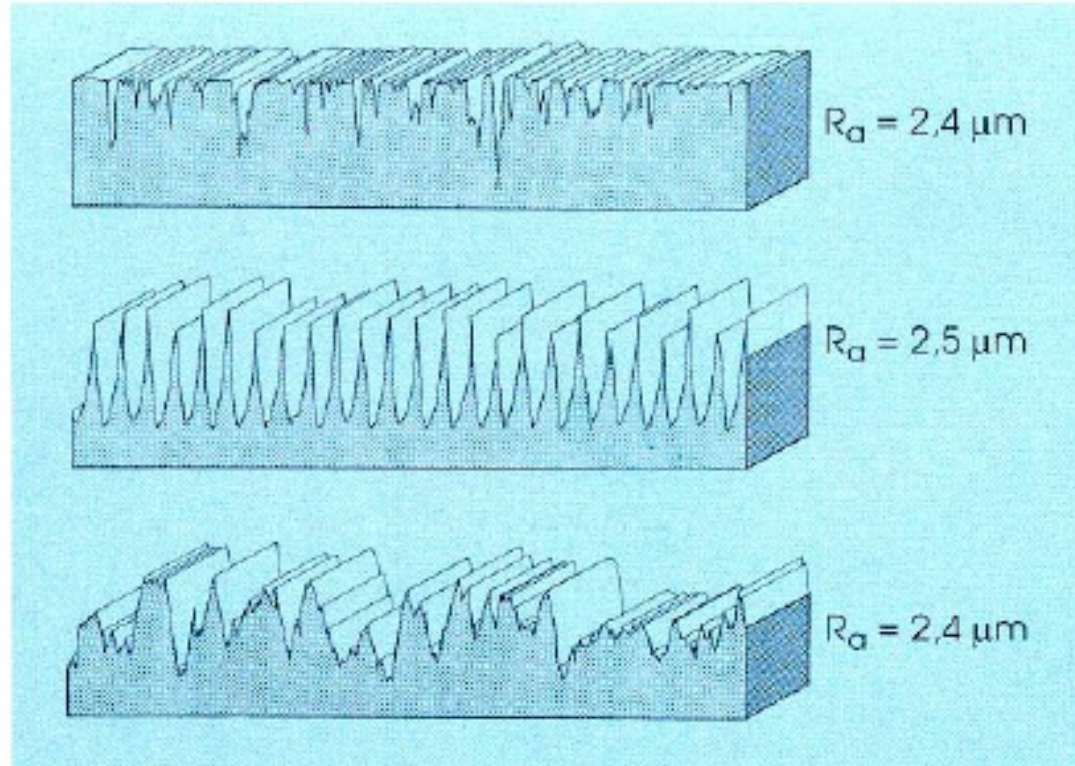
Si osservi che, nonostante sia il parametro di gran lunga più usato, R_a non è un parametro sufficiente per la descrizione ed il confronto di rugosità superficiali nemmeno ai fini tecnologici.



(differenze nella forma di picchi e valli)

R_a : critica

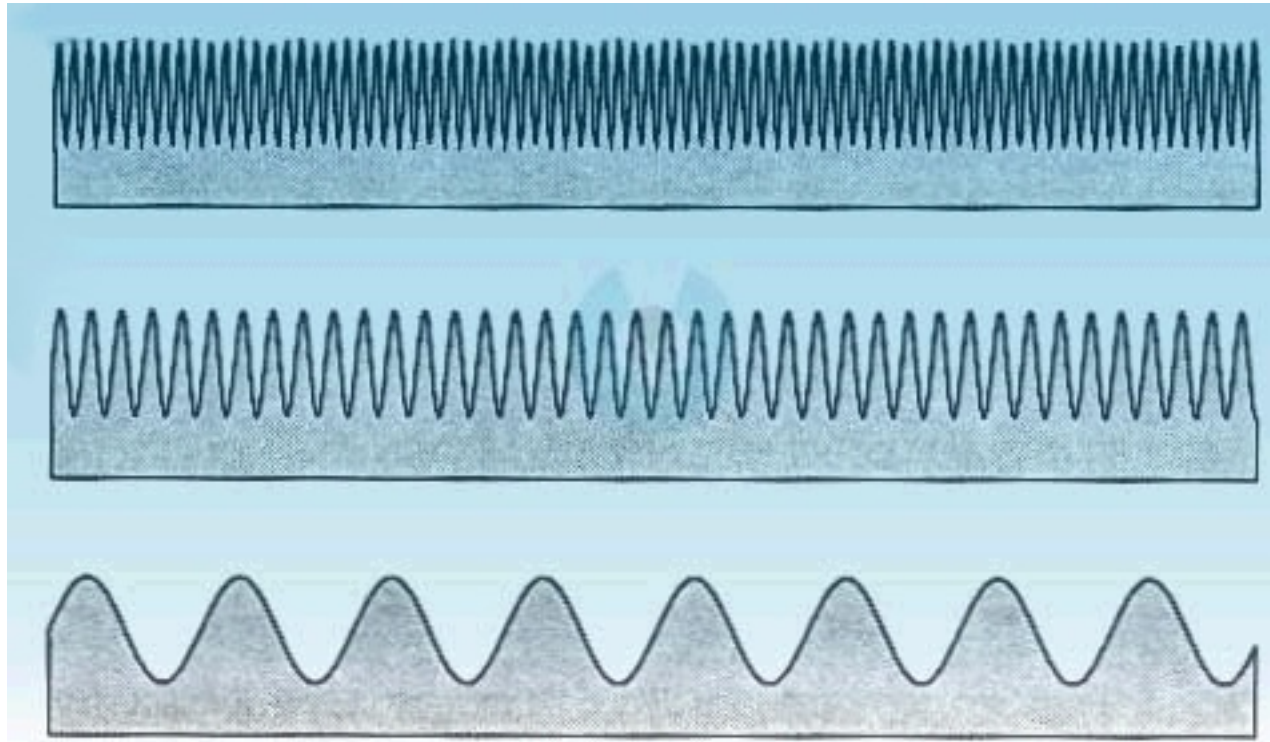
Un altro esempio:



(differenze nella forma di picchi e valli)

R_a : critica

Si possono avere valori di R_a identici anche con notevoli differenze nella spaziatura di picchie e valli, oltre che per la loro forma.



(differenze nella spaziatura)

R_a : critica

$$\sin(x) \quad [0, 2\pi]$$

$$R_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\sin(x)| dx = -2 \frac{1}{2\pi} \cos(x) \Big|_0^{\pi} = 2 \frac{1}{2\pi} 2 = \frac{2}{\pi}$$

$$\sin(nx) \quad [0, 2\pi]$$

$$R_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |\sin(nx)| dx = -2n \frac{1}{2n\pi} \cos(nx) \Big|_0^{\pi/n} = 2 \frac{1}{2\pi} 2 = \frac{2}{\pi}$$

R_q

R_q

È la rugosità quadratica media. Per un profilo sinusoidale è proporzionale ad R_a , ma in pratica questa approssimazione vale molto raramente. È in effetti un parametro poco usato in meccanica.

Matematicamente è definito come:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |r^2(x)| dx}$$

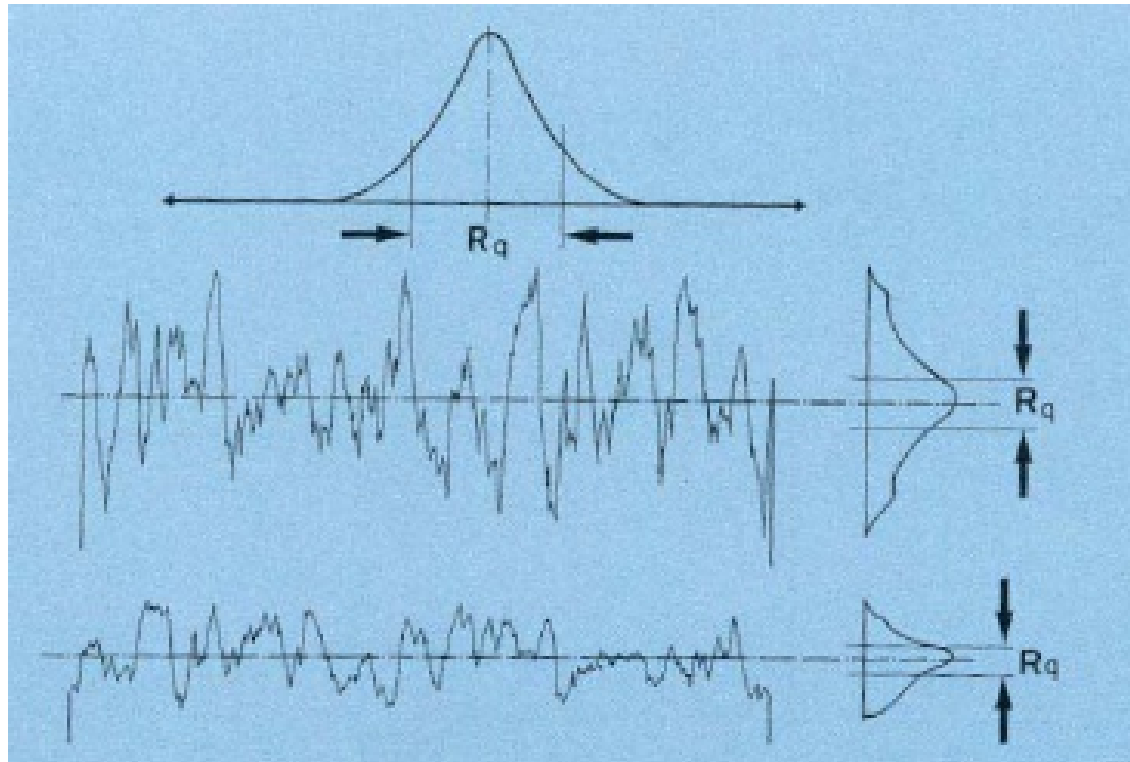
Se il calcolo viene effettuato a partire da dati digitali, utilizzando la regola del trapezio per approssimare l'integrale, si ha:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i^2}$$

R_q

R_q

R_q rappresenta la deviazione standard:



Maggiore sensibilità risp. R_a nei confronti della presenza di picchi particolarmente alti (e valli particolarmente profonde).

$$R_t, R_p, R_v$$

$$R_t, R_p, R_v$$

R_p è l'altezza del picco più alto ed R_v è la profondità della valle più profonda nella lunghezza di misura.

R_t è la somma di questi due valori.

$$R_p = |\max(r(x))| \quad 0 < x < L$$

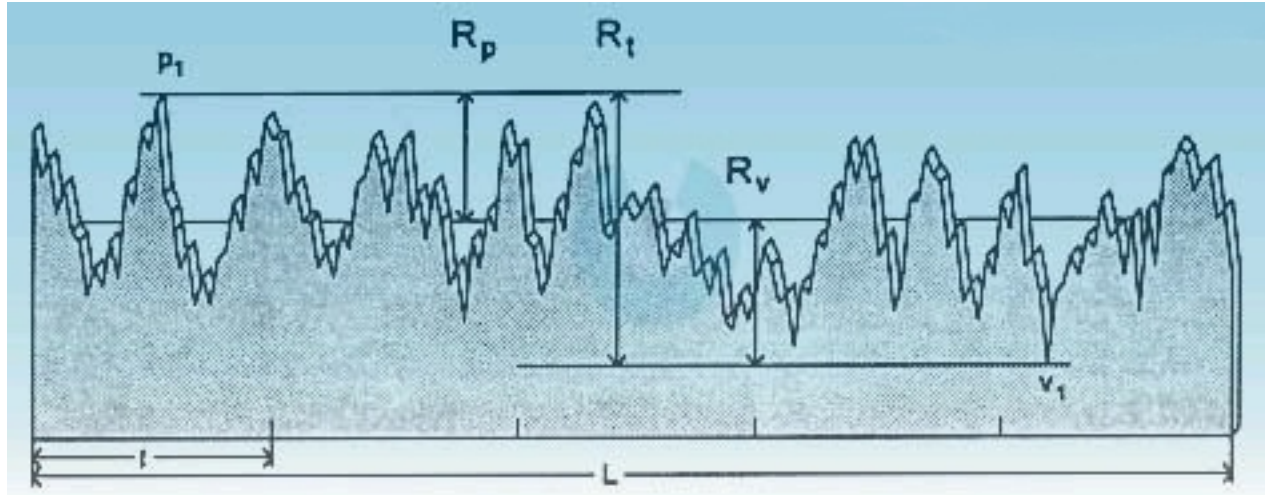
$$R_v = |\min(r(x))| \quad 0 < x < L$$

$$R_t = R_p + R_v$$

Questi parametri sono utili per caratterizzare caratteristiche estreme del profilo di rugosità, come ad esempio profondi intagli che potrebbero compromettere una tenuta pneumatica o idraulica, oppure cricche o bave indicative di materiale o processo scadenti.

R_t , R_p , R_v

Figura indicativa per la valutazione di R_t , R_p ed R_v :



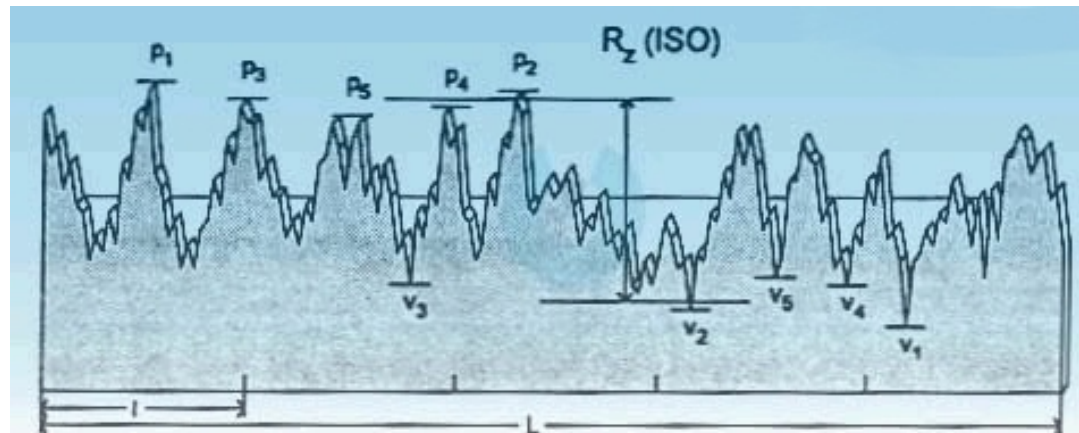
R_z (DIN), R_z (ISO)

R_z (DIN), R_z (ISO)

Calcolando il valore di R_t per un certo numero M di lunghezze di campionamento consecutive (di solito cinque), si può definire R_z (DIN) come:

$$R_y = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_{t,i}$$

R_z (ISO) è valutata in modo simile a R_t , ma estendendo la valutazione a tutto il tratto di misura $(P_1+P_2+P_3+P_4+P_5-(V_1+V_2+V_3+V_4+V_5))/5$, linea di rif. non intersecante il profilo e parallela alla linea media.



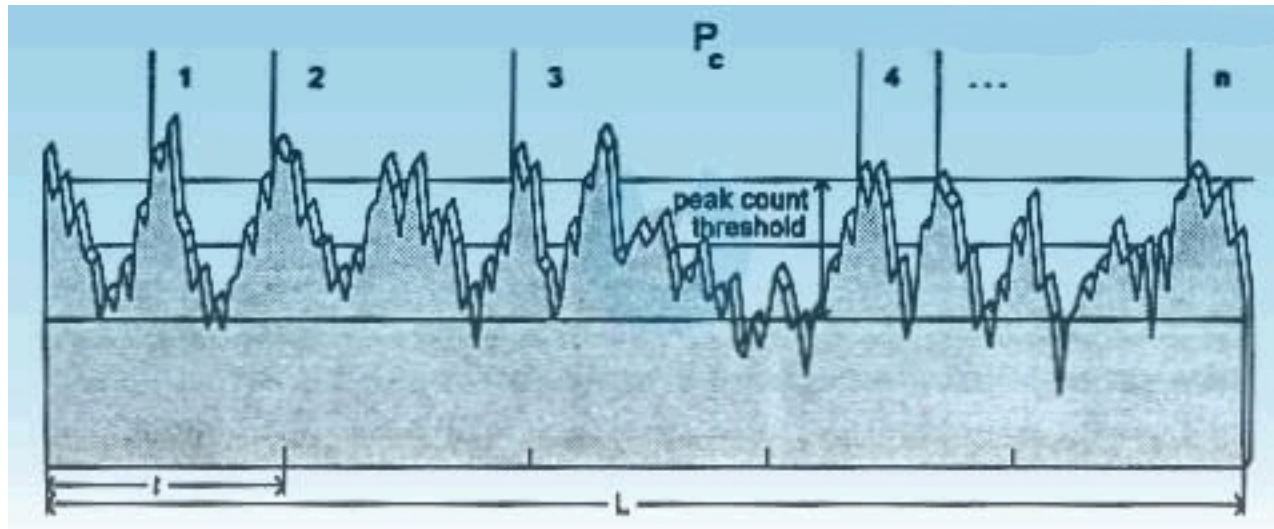
Spaziatura

Parametri di spaziatura

P_c

E' il numero di picchi per lunghezza di misura, diviso per la lunghezza di misura stessa ([picchi/mm]). Vengono conteggiati solo i picchi che intersecano sia una soglia superiore che una inferiore.

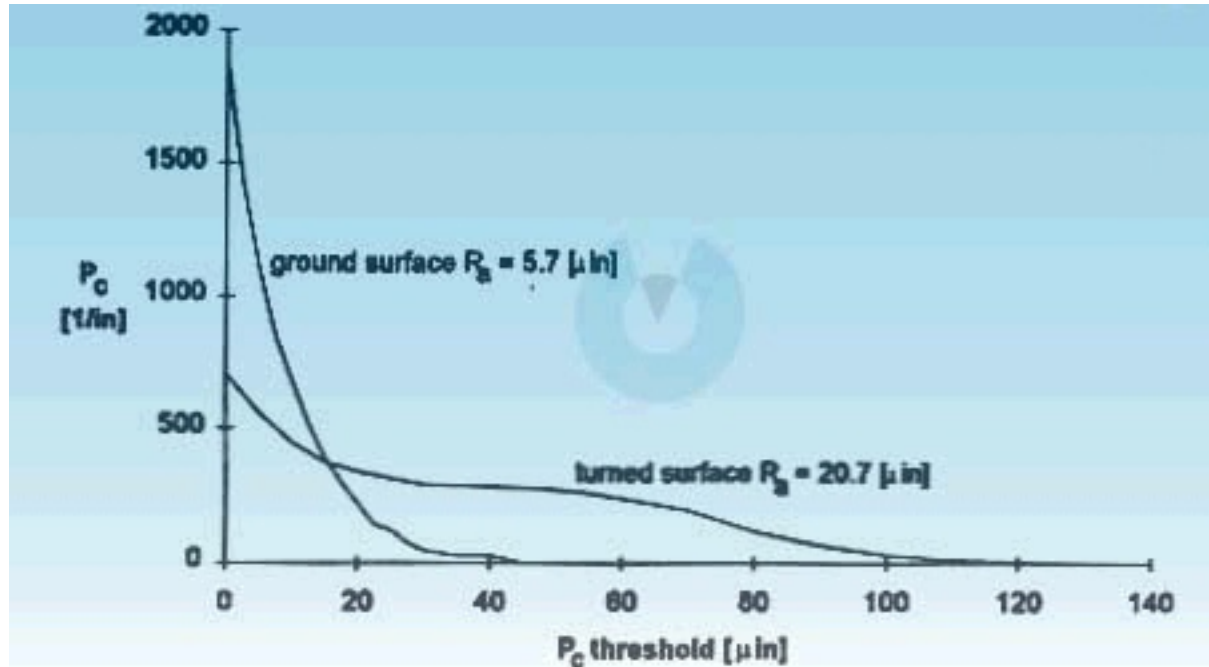
Spesso vi è una forte dipendenza del valore di P_c dalla scelta dei valori di soglia e perciò tale parametro viene utilizzato raramente.



P_c

P_c

Dipendenza di P_c dai valori di soglia: caso di superficie rettificata e superficie tornita:

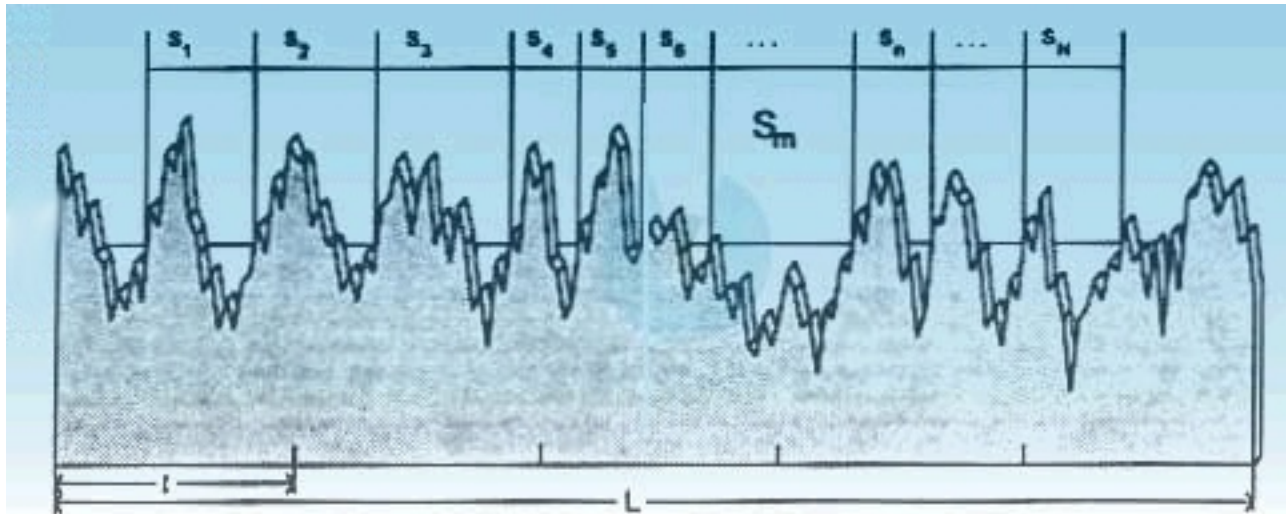


S_m

S_m

E' la spaziatura media tra i picchi, con i picchi definiti mediante l'uso della linea media come visibile in figura.

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i$$



Altri parametri

Parametri ibridi

L_0

Un modo per descrivere quanto un profilo differisca da una linea retta è quello di “distenderlo” e valutare la lunghezza del segmento ottenuto. Tale parametro di valutazione è importante quando i fenomeni che si desidera studiare sono legati all’area superficiale specifica (es.: corrosione, adesione di coatings, ecc.).

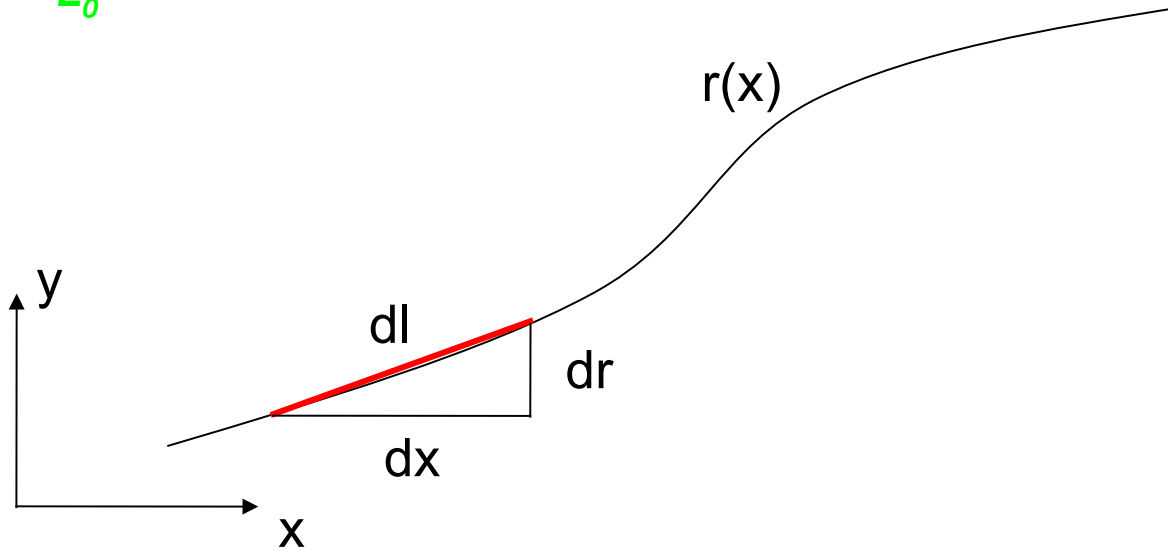
$$L_0 = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dr(x)}{dx} \right)^2} dx$$

Il valore della derivata va calcolato numericamente mediante un’opportuna approssimazione quando si debba calcolare il valore di L_0 da dati digitali (problema).

Altri parametri

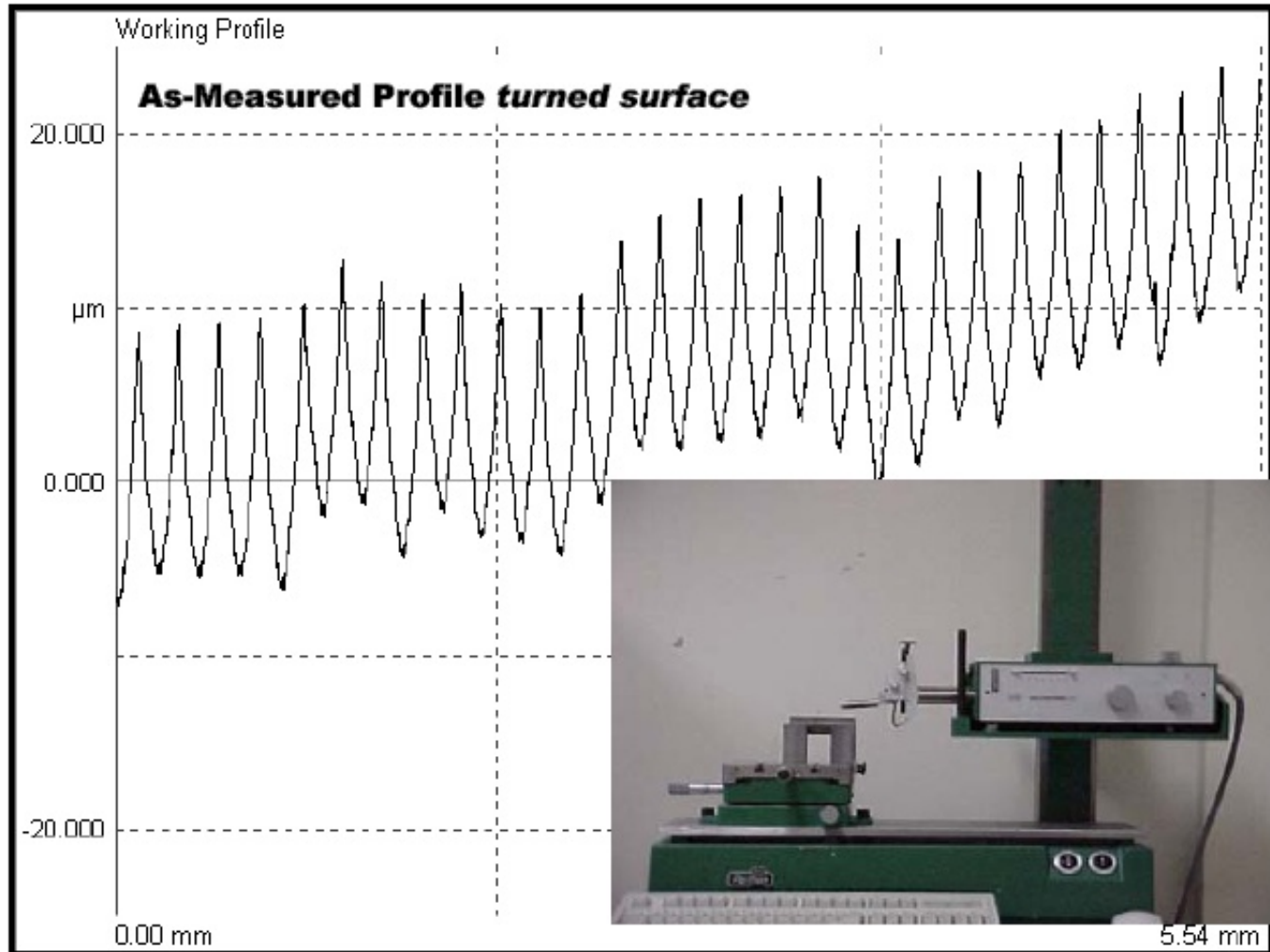
Parametri ibridi

L_0



$$L_0 = \int_0^L dl = \int_0^L \sqrt{dx^2 + dr^2} = \int_0^L \sqrt{\left[1 + \left(\frac{dr(x)}{dx}\right)^2\right]} dx$$

Strumenti di misura



Analisi statistica

Analisi statistica della rugosità

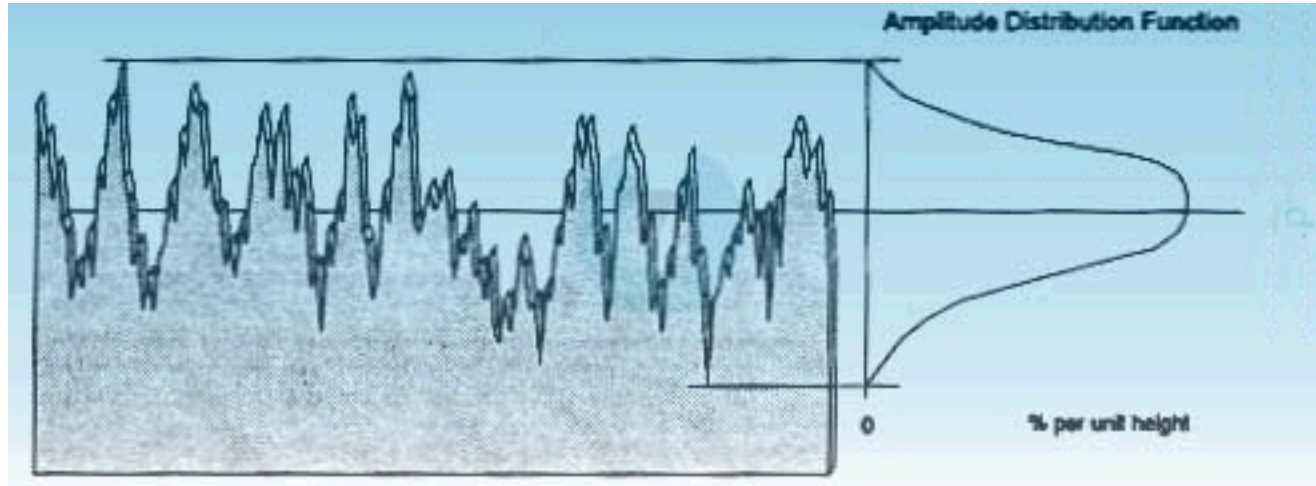
Curva di densità delle ordinate

E' una funzione che fornisce la probabilità che in una qualsiasi posizione della lunghezza di misura l'altezza del profilo abbia un certo valore. Può essere pensata come limite di una distribuzione discreta ottenuta dividendo l'asse delle ordinate in un certo numero di classi e tracciando l'istogramma in cui l'altezza della barra rappresentativa di una classe sia il numero di punti (o la somma delle ampiezze dei segmenti) che stanno in quella classe, diviso l'ampiezza della classe stessa. Matematicamente, detta $f(z)$ tale distribuzione, si può dire che:

$$f(z)dz = \text{prob}(z + dz > r(x) > z)$$

Si osservi che R_q , già definito, rappresenta la varianza (e quindi l'"ampiezza") di tale distribuzione.

Densità delle ordinate



Skewness

R_{sk} (skewness)

Vi sono altri parametri che descrivono la forma della curva di densità delle ordinate. Uno di questi è la cosiddetta “skewness”:

$R_{sk} < 0$ plateau+valli (es.: superfici porose)

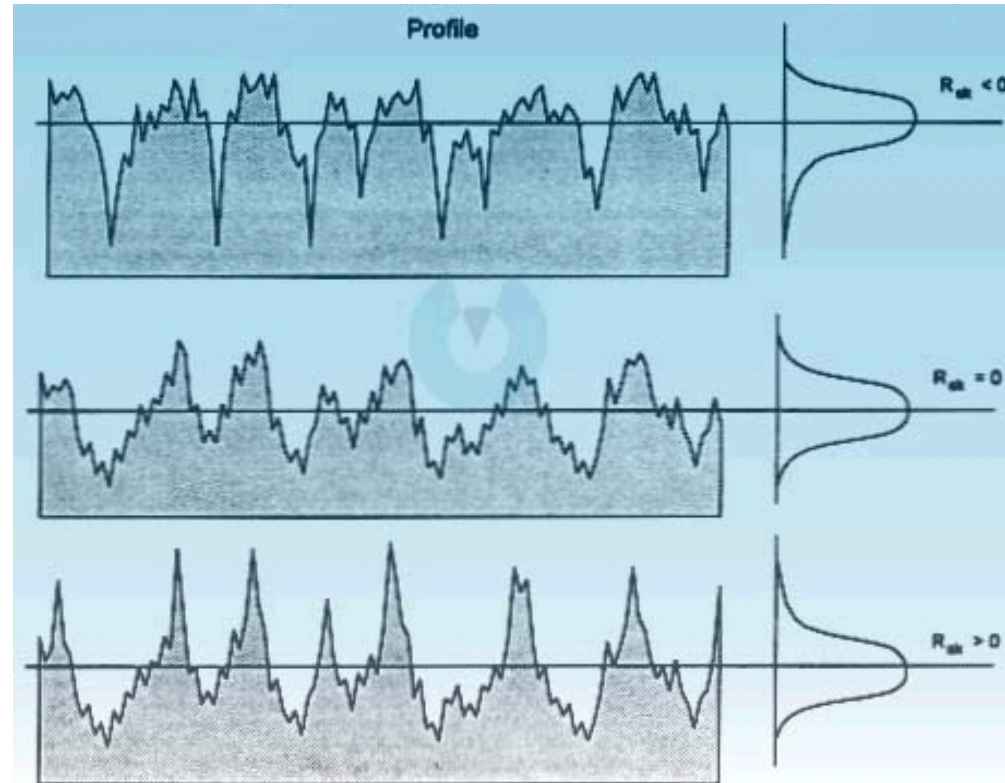
$R_{sk} = 0$ superfici a distribuzione casuale della rugosità (es.: rettifica)

$R_{sk} > 0$ plateau+picchi (es.: superfici tornite)

Matematicamente R_{sk} viene definita come:

$$R_{sk} = \frac{1}{LR_q^3} \int_0^L r^3(x) dx$$

Skewness

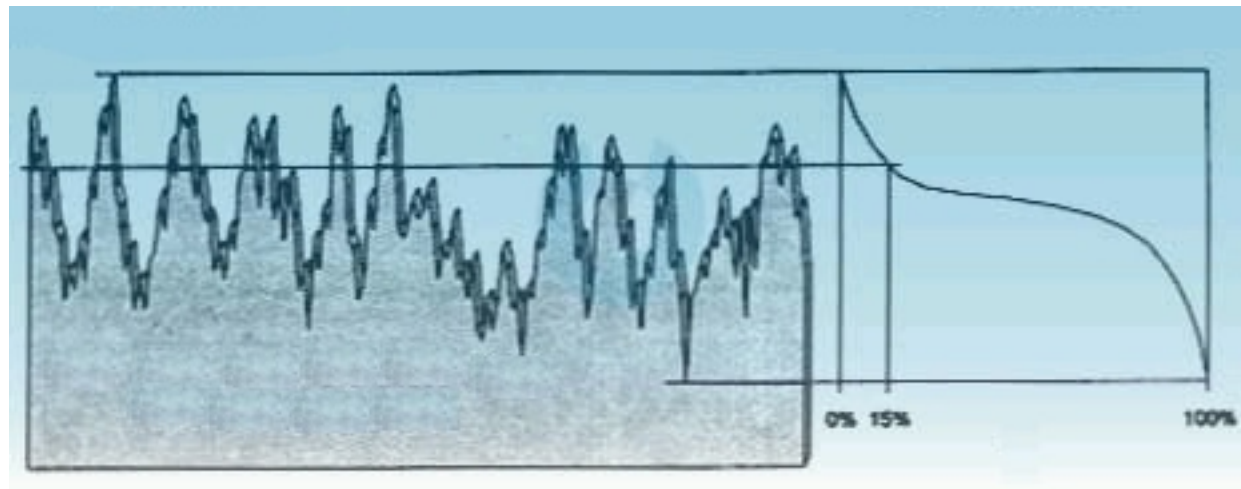


Tale parametro è correlato con la capacità di sopportare carichi, con la capacità di preservare le tolleranze e di fornire risultati più o meno precisi nelle misurazioni. Se $R_{sk} > 1$ si può ritenere che R_a non sia un parametro sufficiente per descrivere la superficie ai fini funzionali. Si osservi che R_{sk} può variare pur rimanendo invariati R_a e R_q .

Abbott

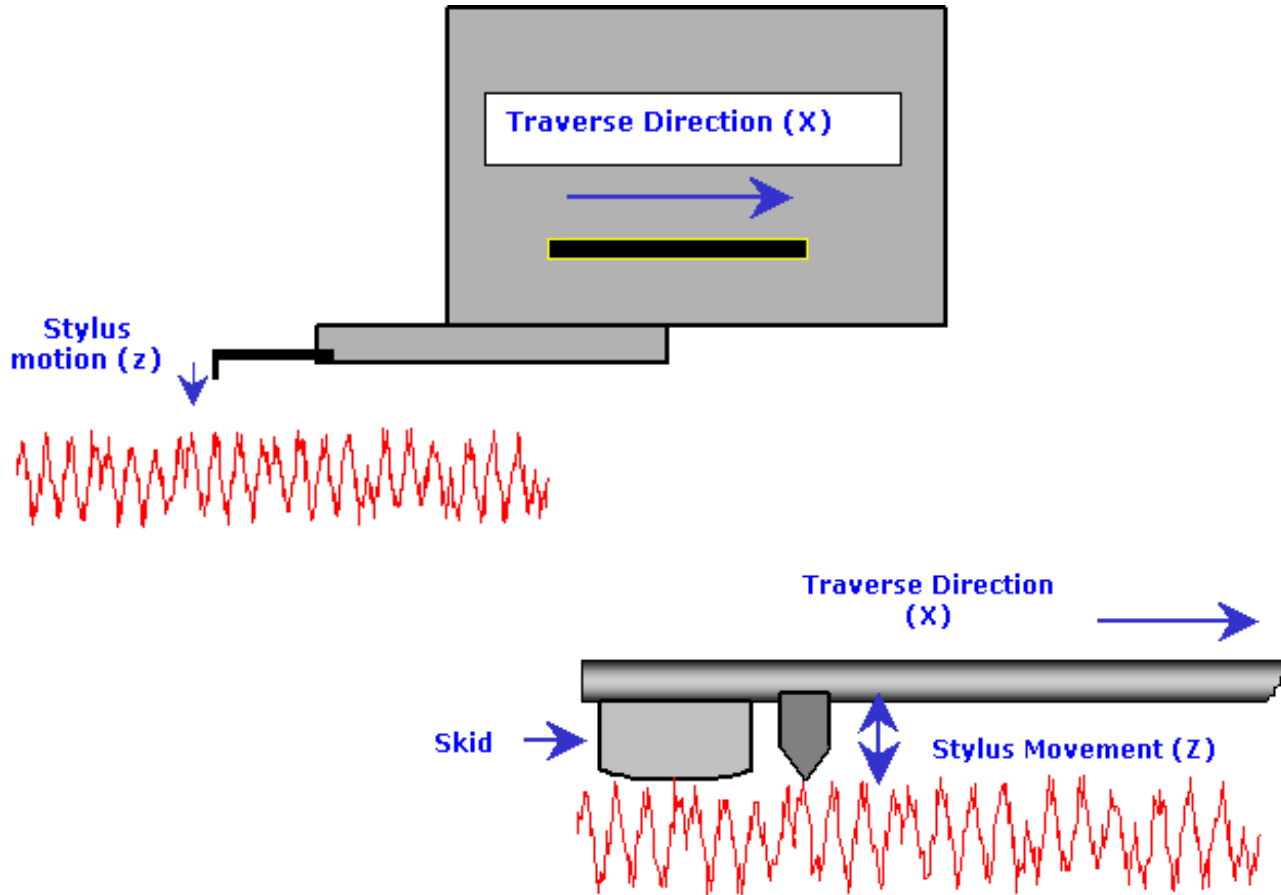
Curva di Abbott o di portanza

Matematicamente è l'integrale della curva di densità delle ordinate e rappresenta quindi una distribuzione di probabilità cumulativa. Normalmente si calcola l'integrale partendo dal picco più alto del profilo: in questo modo ogni valore della curva ottenuta rappresenta la frazione lineare del profilo che sta al di sopra dell'altezza considerata.



Strumentazione

Profilometri meccanici



Strumentazione

Profilometri meccanici

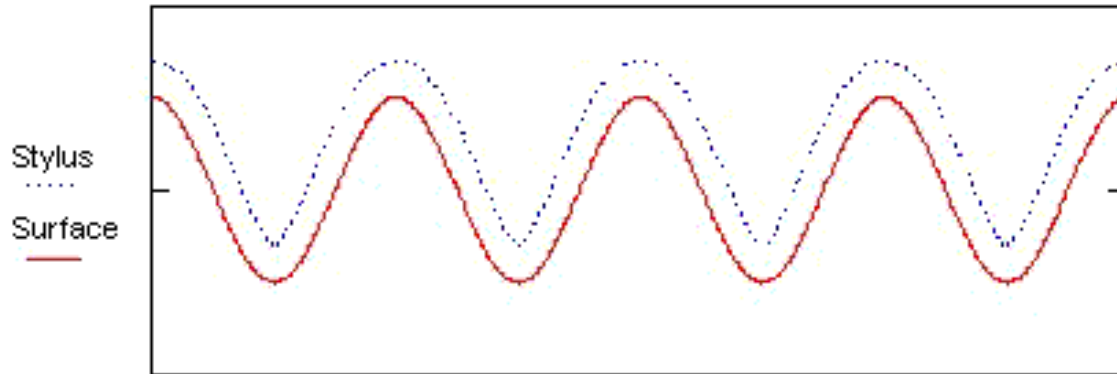
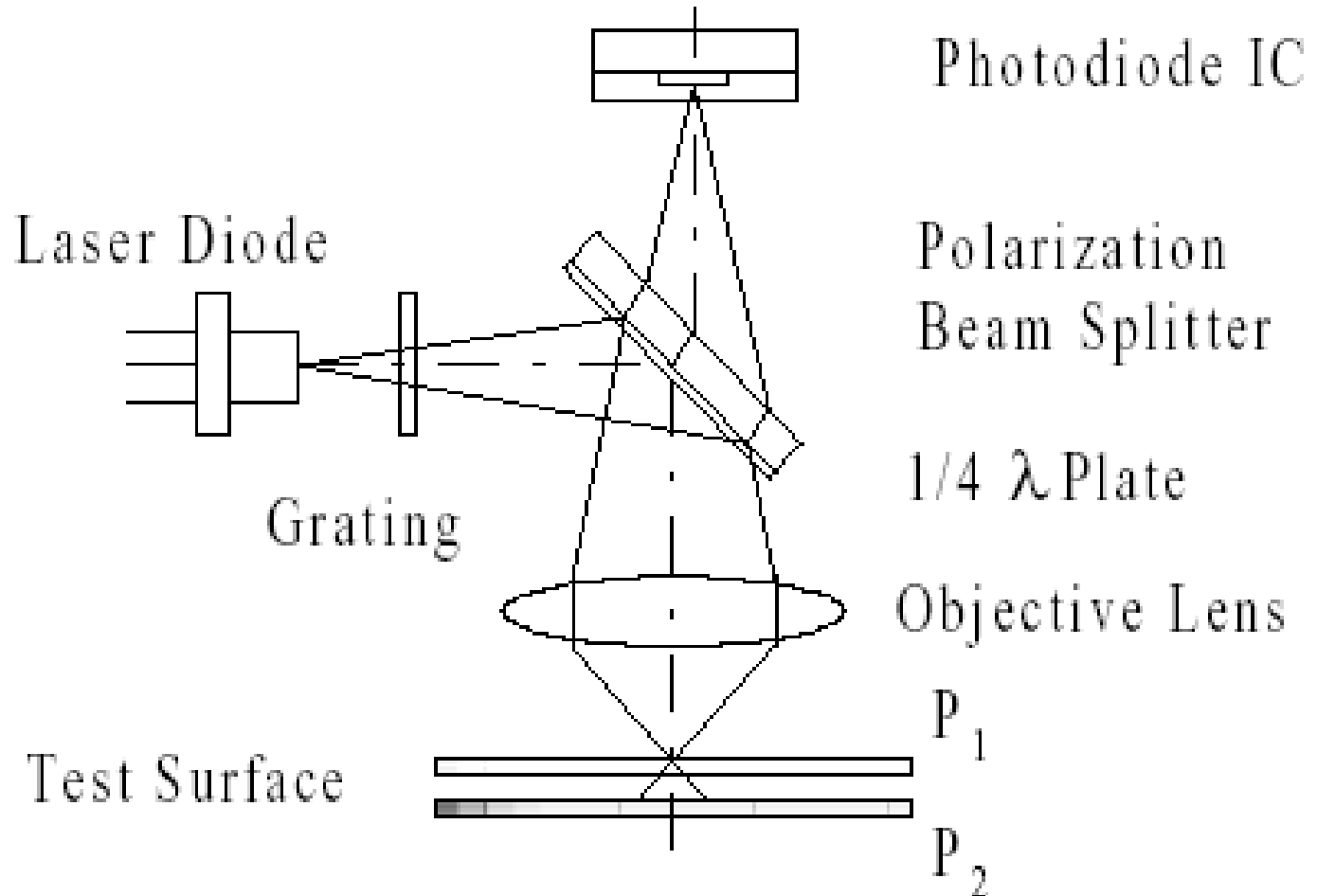


Figure1 - showing distortion due to finite stylus size.

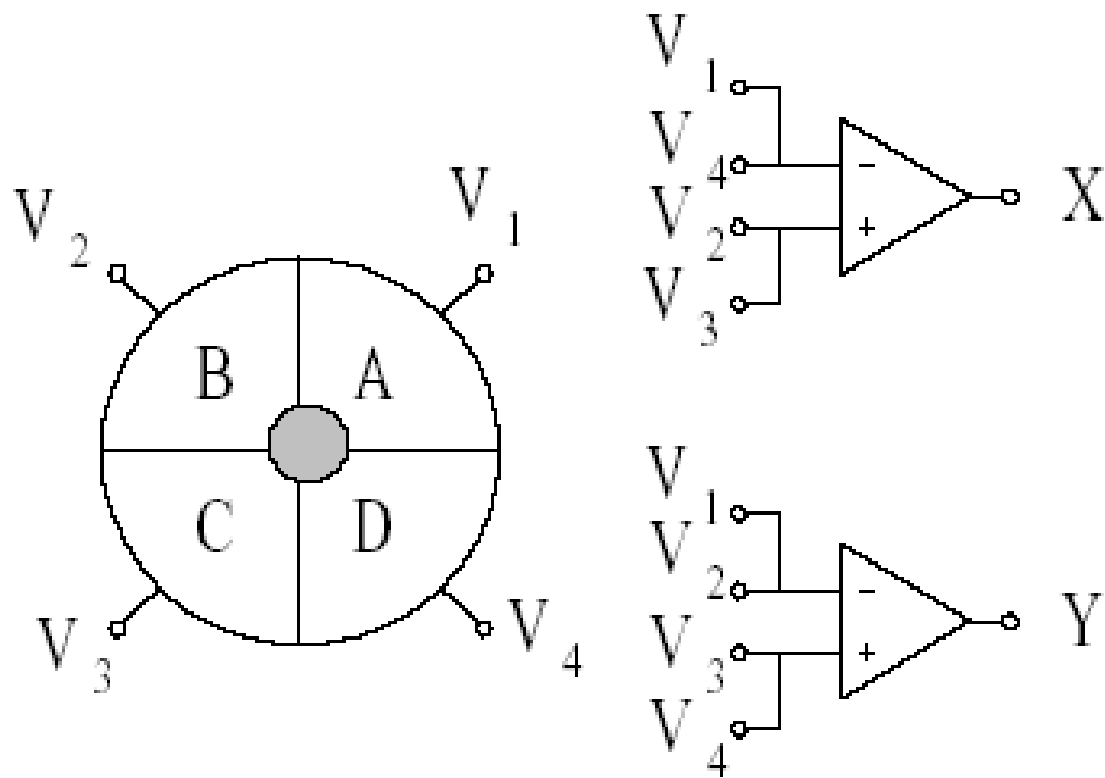
Strumentazione

Profilometri ottici



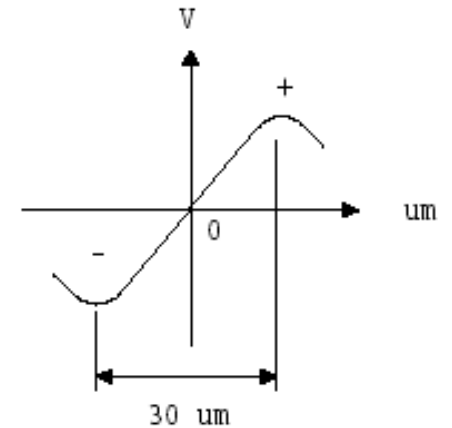
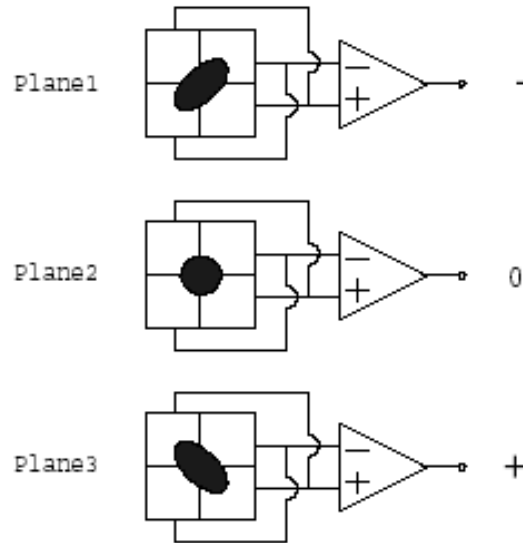
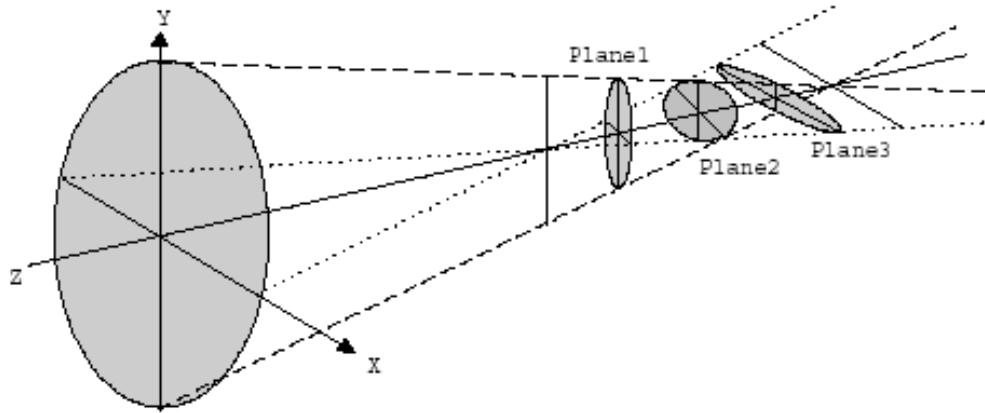
Strumentazione

Profilometri ottici



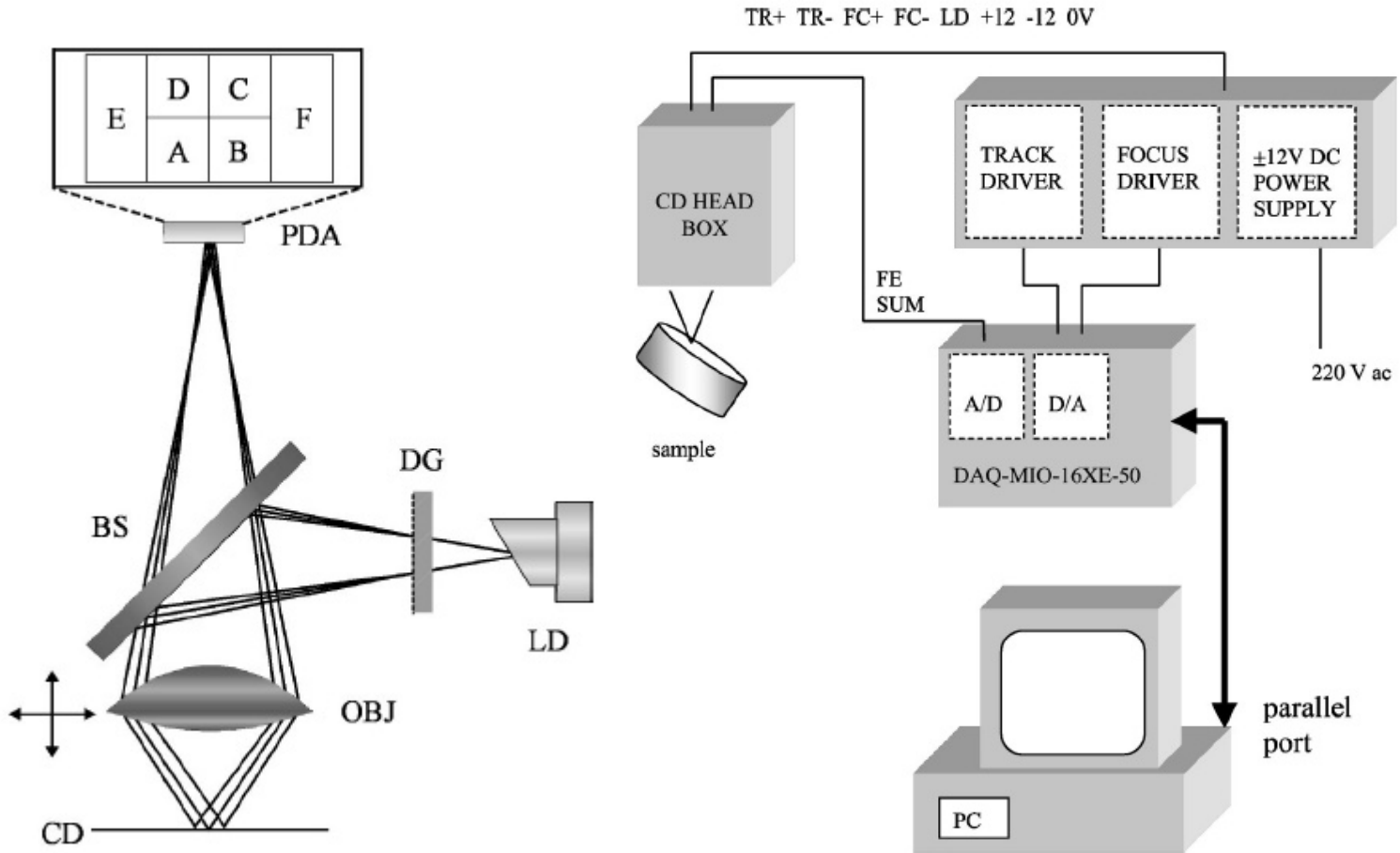
Strumentazione

Profilometri ottici



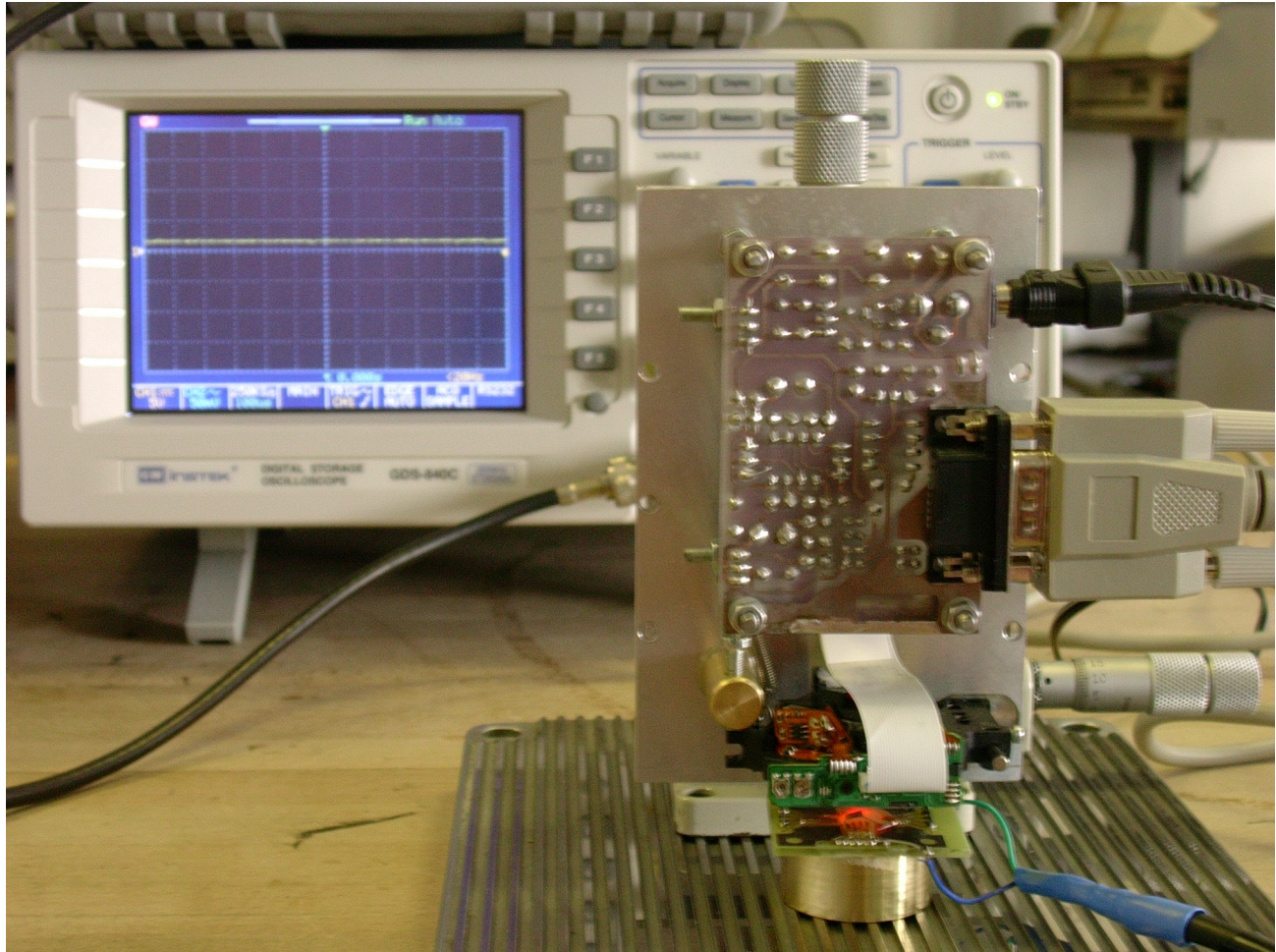
Strumentazione

Profilometri ottici



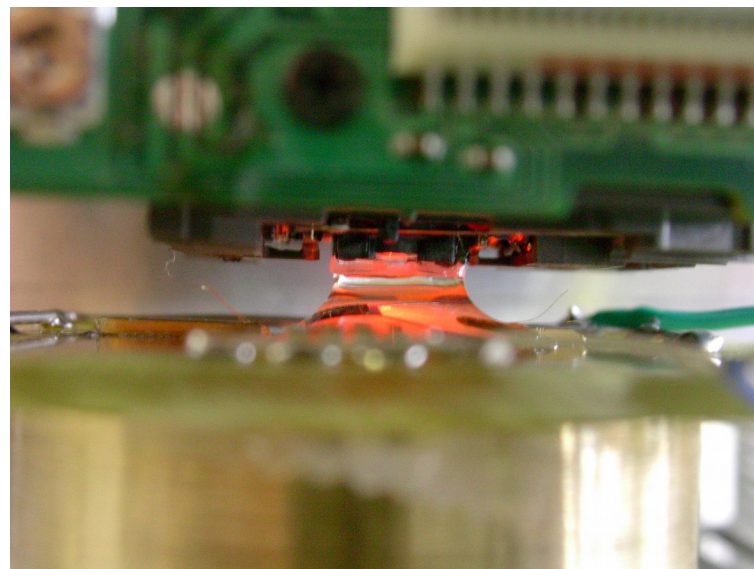
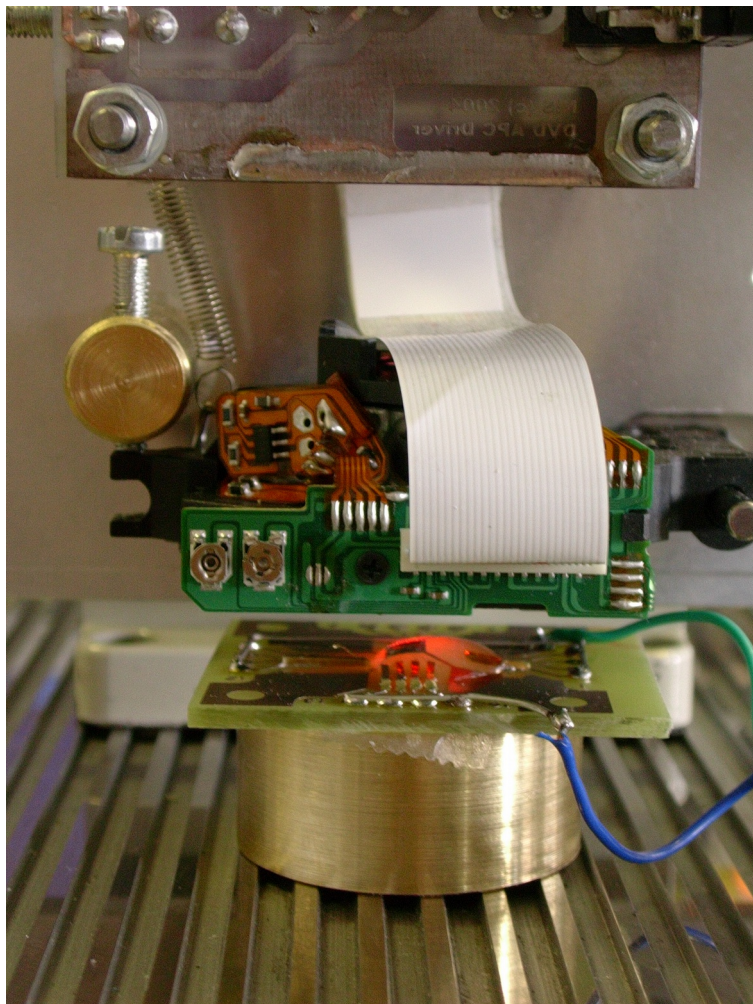
Strumentazione

Profilometri ottici



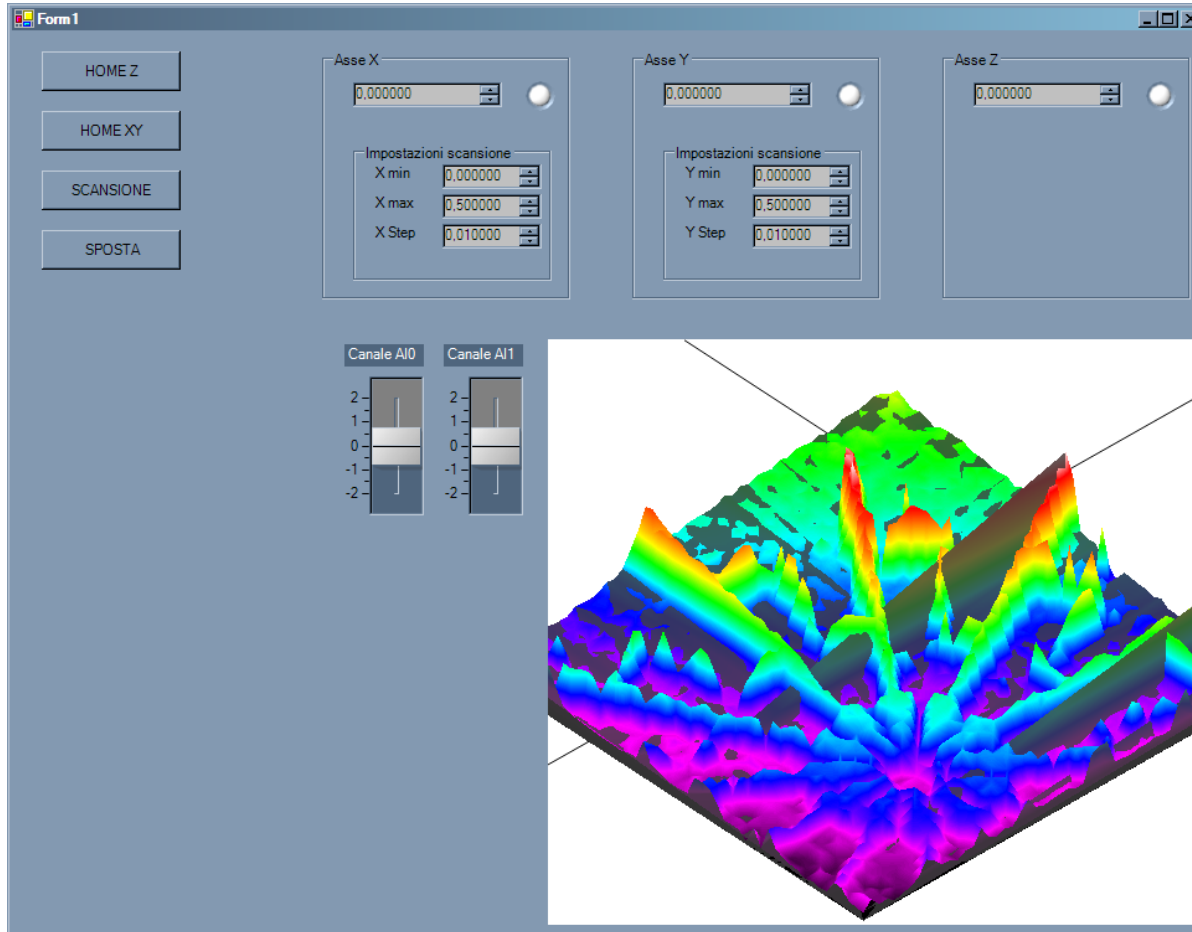
Strumentazione

Profilometri ottici



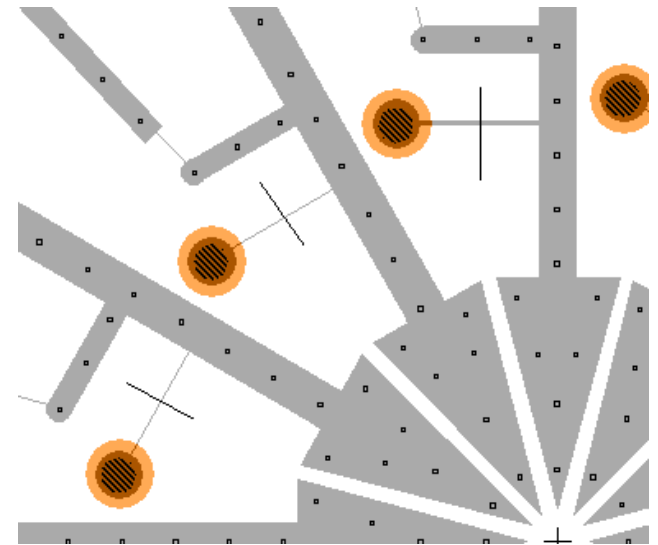
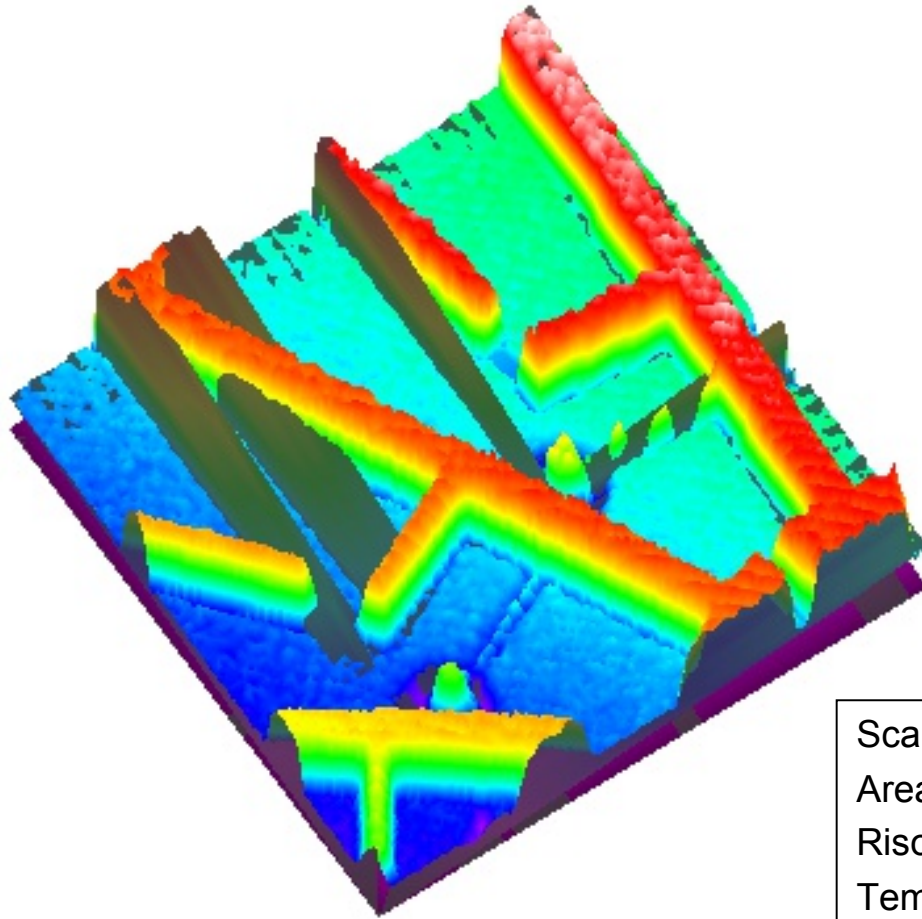
Strumentazione

Profilometri ottici



Strumentazione

Profilometri ottici



Scansione:	MEMS_test_1
Area:	200x200 μm
Risoluzione:	256x256 punti
Tempo:	12'