

ESERCITAZIONE SUL RILEVAMENTO DELLA RUGOSITÀ SUPERFICIALE

Introduzione

Qualsiasi superficie anche se lavorata con grande accuratezza, esaminata con un mezzo ottico a sufficiente ingrandimento, rivela scabrosità costituite da solchi e creste che determinano scostamenti locali, più o meno estesi, della superficie reale rispetto a quella ideale indicata dal disegno. Il grado di finitura delle superfici lavorate è certamente un parametro importante di cui si deve tenere conto nella ricerca della buona qualità dei prodotti fabbricati. Non è sufficiente infatti cercare un miglioramento della qualità dei prodotti attraverso il solo impiego di materiali con migliori caratteristiche meccaniche, o attraverso l'adozione di tolleranze dimensionali assai spinte, se non la si accompagna da un buon livello di finitura superficiale.

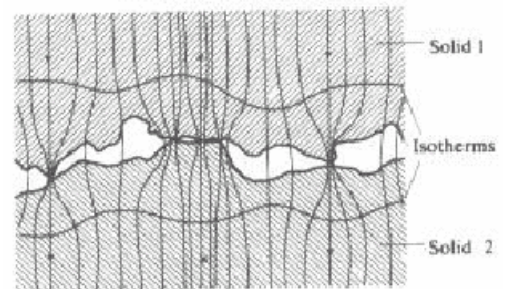
Appare evidente come il grado di finitura superficiale sia fondamentale per il buon funzionamento di componenti meccanici destinati all'accoppiamento, e quanto questo, e in particolare il grado di riempimento del profilo, influisca sulla resistenza all'usura e a fatica.

E' inoltre noto che superfici con elevato grado di finitura superficiale presentano migliore resistenza alla corrosione rispetto alle superfici con elevata rugosità.

Non è detto tuttavia che raggiungere il più basso valore possibile di rugosità sia sempre la soluzione migliore; anzi in generale non lo è. Innanzi tutto perché un elevato grado di finitura superficiale implica solitamente elevati costi di lavorazione.

In alcune circostanze inoltre un minimo di rugosità risulta indispensabile, come avviene ad esempio per i componenti che necessitano di lubrificazione. In questi casi se la dimensione delle asperità presenti sulla superficie è troppo piccola l'olio non ha la possibilità di ancorarsi alla superficie stessa e di conseguenza scivola via senza poter assolvere il suo compito.

Va ricordato inoltre che un'altra area dove la rugosità superficiale gioca un ruolo importante è la resistenza di contatto [Tho99]. La conduzione termica o elettrica tra due superfici in contatto avviene soltanto attraverso certe regioni. Nel caso della conduzione termica, per esempio, le linee di flusso si vanno a concentrare nelle aree di contatto, con il risultato finale di una distorsione evidente delle linee isoterme così come mostrato nella figura a lato.



L'influenza della rugosità si estende a vari campi ingegneristici come quelli riguardanti il controllo del rumore e delle vibrazioni, le tolleranze dimensionali, i processi abrasivi e la geomorfologia.

Definizioni di base

Per introdurre l'argomento della misura del grado di finitura superficiale degli elementi meccanici è necessario premettere alcune definizioni.

- *Superficie ideale* è la superficie geometrica che idealmente definisce il pezzo ed è rappresentata in modo convenzionale sul disegno.
- *Superficie reale* è la superficie effettivamente ottenuta mediante la lavorazione.
- *Superficie misurata* (o tecnica) è la superficie rilevata dagli strumenti di misura microgeometrica.
- *Superficie di riferimento* è la superficie che viene utilizzata per la misura degli errori geometrici.
- *Superficie media* è quella con forma uguale a quella descritta dal pattino o a quella del riferimento esterno, con giacitura tale che la somma dei quadrati delle distanze dalla superficie reale è minima.

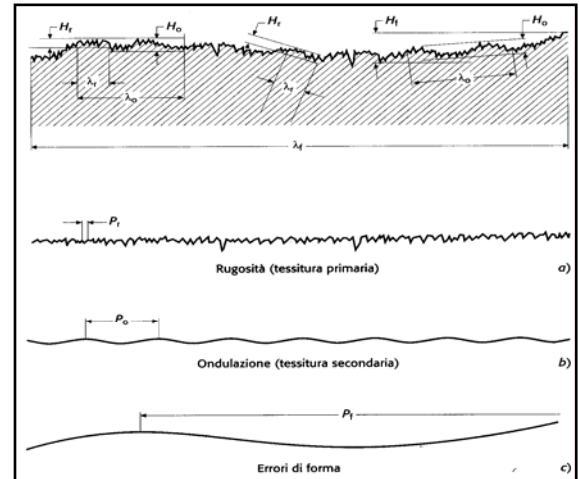
Si definisce poi sezione nominale una sezione fatta con un piano ortogonale alla superficie media, detto anche piano di rilievo. Vengono inoltre definiti i vari profili, ottenuti con questa sezione, delle superfici prima definite e cioè: profilo reale, profilo misurato, profilo di riferimento, profilo medio.

Le irregolarità superficiali vengono classificate nel seguente modo:

- *errori di forma* i quali corrispondono alle deviazioni della superficie misurata dalla superficie media, depurata dagli errori microgeometrici;
- *errori microgeometrici* che sono a loro volta suddivisi in rugosità (o tessitura primaria) e ondulazioni (o tessitura secondaria).

Gli errori di forma sono irregolarità macroscopiche di piccola ampiezza H_f e passo molto grande P_f . La rugosità invece deriva da irregolarità microgeometriche di ampiezza molto piccola H_r e piccolo passo H_r . Infine le ondulazioni sono irregolarità microgeometriche di ampiezza e passo maggiori di quella della rugosità H_o e P_o .

I tre tipi di errore geometrico si distinguono essenzialmente per il valore del passo delle irregolarità. Generalmente si considera il rapporto passo/ampiezza e da esso si può risalire a tutti i vari errori.



Tipi di irregolarità superficiali		passo/ampiezza
Errori microgeometrici	Rugosità (o tessitura primaria)	$0 < P_r / H_r < 50$
	Ondulazione (o tessitura secondaria)	$0 < P_o / H_o < 50$
Errori macrogeometrici	Errori di forma	$P_f / H_f > 1000$

Per rugosità superficiale si intende il complesso delle deviazioni (errori microgeometrici) della superficie reale dalla superficie tecnica.

Parametri di rugosità e ondulazione

Il grado di finitura superficiale è quantificato mediante vari parametri che si riferiscono a determinate caratteristiche della tessitura. Questi possono essere classificati in tre gruppi a seconda del tipo di caratteristica che misurano.

- Parametri di ampiezza: sono misure degli spostamenti verticali del profilo.
- Parametri di spaziatura: sono misure della spaziatura e delle irregolarità lungo la superficie.
- Parametri ibridi: si riferiscono sia all'ampiezza che alla spaziatura delle irregolarità.

I parametri che nei vari anni sono stati proposti per la misura della rugosità e dell'ondulazione sono molti: allo stato attuale si sta ancora discutendo della loro razionalizzazione e soprattutto della scelta di quelli più significativi. Dei molti parametri presenti in letteratura ne riportiamo solo i più comuni [ISOxx].

Parametri di ampiezza

Rugosità media aritmetica [Ra] sicuramente è il parametro più comune e rappresenta il valore medio assoluto degli scarti della superficie reale da quella tecnica e viene calcolato con la formula seguente.

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

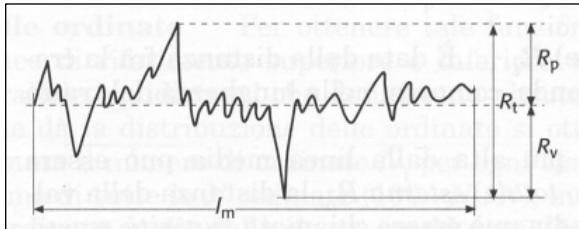
Esso risulta il parametro più comunemente usato nella misura di finitura superficiale. Tuttavia non descrive completamente una superficie, infatti può capitare che profili sostanzialmente differenti presentino lo stesso Ra, quindi è necessario andare a definire altri parametri.

La rugosità media quadratica [Rq] rappresenta il valore quadratico medio della superficie reale da quella tecnica:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} y^2(x) dx} \cong \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|^2}$$

Tra i parametri Ra e Rq è generalmente accettata una relazione del tipo: $Rq = 1.11 Ra$.

Attualmente Rq, nelle specifiche delle lavorazioni dei metalli, è stato quasi completamente sostituito da Ra.



Rugosità massima o totale [Rt] è data dalla massima distanza fra la cresta più alta R_p e la valle più profonda R_v :

$$Rt = Rp + Rv$$

La rugosità totale dà immediatamente il concetto di campo di tolleranza, cioè come ampiezza della fascia entro la quale devono essere comprese le irregolarità superficiali, anche se è alla fine un parametro poco significativo, in quanto può essere fortemente influenzato da un'irregolarità accidentale della superficie.

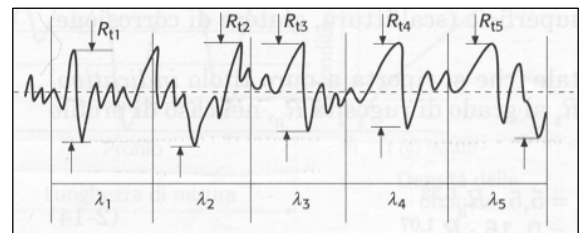
Accanto a questo parametro può essere inserito P_t che rappresenta la distanza tra due linee parallele e tangenti al profilo.

[Rz] è data dalla media aritmetica delle altezze delle 5 creste predominanti e delle 5 valli più profonde, valutate sulla lunghezza del tratto di misura:

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^n |y_{\max i}| + \sum_{i=1}^n |y_{\min i}| \right)$$

$$R_y = \max R_{ii}$$

dove: $R_{ii} = \max y_j - \min y_j$ e j varia tra 1 e il numero di cut-off e i è l' i -esimo cut-off (cut-off=lunghezza di campionamento).



Parametri di spaziatura

Spaziatura media [Sm] : è la spaziatura media tra i picchi, essendo i picchi definiti rispetto alla linea media. Un picco deve passare sopra la linea media e ripassare poi sotto a questa. Tale parametro può essere così definito:

$$Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Sm_i$$

Dove Sm_i è la i -esima distanza orizzontale tra due punti, intersezione del profilo con pendenza di uguale segno con la linea dello zero.

Spaziatura media delle irregolarità del profilo [S] :

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

Dove S_i è la i -esima distanza orizzontale tra due punti intersezione del profilo con pendenza di uguale segno con una linea a distanza d dalla linea dello zero.

Lunghezza del profilo sviluppato $[L_0]$: rappresenta la lunghezza del profilo se questo idealmente venisse stirato lungo una linea retta, e serve per confrontare come un profilo reale differisce da una linea orizzontale:

$$L_0 = \int_0^{l_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \cong \frac{l_m}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right)^2}$$

Rapporto delle lunghezze del profilo $[L_r]$: è il rapporto tra la lunghezza del profilo sviluppato e la lunghezza di valutazione

$$L_r = \frac{L_0}{L_m}$$

Esso dà una più utile misura della forma della superficie rispetto alla lunghezza del profilo. Più grande è il valore di L_r e più il profilo è caratterizzato da picchi e increspature e quindi più è grande l'area effettiva della superficie.

$[P_c]$ è uguale al numero di picchi

Parametri ibridi

Pendenza media assoluta $[\Delta a]$: è la media dei valori assoluti della pendenza del profilo di rugosità sulla lunghezza di valutazione e può essere matematicamente così definita:

$$\Delta a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} \left| \frac{dy}{dx} \right| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right|$$

Δq rappresenta la media del valore quadratico medio delle pendenze del profilo:

$$\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx} \cong \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right)^2}$$

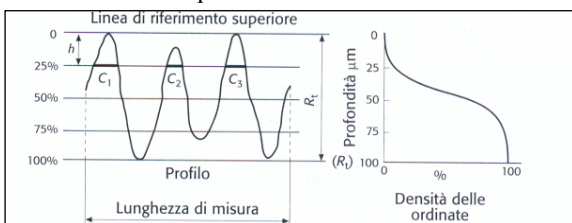
I parametri appena definiti non sono in genere sufficienti a caratterizzare completamente la funzionalità di una superficie dal punto di vista dell'usura, degli accoppiamenti forzati, ecc...

Così solitamente si introducono dei parametri deducibili dall'analisi statistica i principali sono: la curva di densità delle ordinate e la curva di Abbott.

Curva di densità delle ordinate : per ottenere tale funzione la distanza fra le due linee di riferimento superiore ed inferiore viene suddivisa con linee parallele che definiscono altrettante classi. L'istogramma che dà la distribuzione delle ordinate si ottiene mettendo in un diagramma il numero di ordinate N_i per ogni classe i espresso in percentuale dell'insieme di tutte le N ordinate ($100N_i/N$), in funzione del valore y_i dell'ordinata media della classe considerata. La densità percentuale delle ordinate viene poi divisa per l'ampiezza della classe di precisione espressa in μm .

Da questa distribuzione sono deducibili due parametri statistici importanti quali lo Skewness (R_{sk}), che misura l'asimmetria della funzione di densità, e il Kurtosis (R_{ku}), che è equivalente alla densità dei picchi del profilo. I quali rappresentano rispettivamente il momento del terzo ordine della distribuzione delle altezze diviso il momento del secondo ordine elevato alla $3/2$, e il momento del quarto ordine della distribuzione delle altezze diviso il momento del secondo ordine elevato al quadrato.

$$R_{sk} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^2|\right)^{3/2}} = \frac{1}{R_q^3} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^3 \quad R_{ku} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^4}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i^2|\right)^2} = \frac{1}{R_q^4} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^4$$



Curva di Abbott: la curva di Abbott rappresenta l'andamento della frazione portante della superficie in funzione dell'ampiezza delle ordinate. Per ottenere tale curva si procede nel seguente modo: si traccia una serie di linee parallele al di sotto della linea di riferimento superiore e per ognuna di esse si fa il rapporto fra la somma dei segmenti intercettati dal profilo all'interno del medesimo e la lunghezza totale del profilo analizzato, quindi si riporta in grafico in funzione della profondità.

Il Rugosimetro

Lo strumento utilizzato per la misura degli errori microgeometrici è il rugosimetro. Diversi possono essere i metodi di misura che si differenziano in diretti ed indiretti.

Il metodo di misura che noi andremo ad analizzare sarà quello diretto, avendo a disposizione un rugosimetro a palpatore.

Gli elementi che costituiscono questo tipo di strumento sono i seguenti:

- uno stilo, all'estremità del quale è montato un palpatore di diamante di forma conica o piramidale, con angolo minore di 90° , il cui vertice è raccordato con raggio uguale a circa $2.5 \mu m$.

Un trasduttore converte i movimenti dello stilo in un segnale elettrico, e da questi possiamo risalire al profilo. La schematizzazione, molto semplicistica, di come funziona un rugosimetro è rappresentata nella figura a lato.

Lo stilo [Tay03a] è il solo contatto attivo tra strumento e superficie, esso perciò è una parte importante nel sistema di misura, e le sue dimensioni e la forma sono dei fattori che possono andare ad influire sui risultati in determinate condizioni. Infatti poiché il palpatore non può seguire perfettamente la superficie rugosa, per un fatto prettamente geometrico, lo stilo tenderà ad arrotondare picchi e spigoli, e a ridurre le valli.

Lo stilo inoltre, a contatto con la superficie, tenderà a deformarla, per capire se la deformazione è plastica oppure no possiamo fare riferimento all'indice di danno così definito [Tay03b]:

$$\psi = \frac{w^{1/3} E^{2/3}}{3.87 R^{2/3} H}$$

dove w è uguale al carico che agisce sullo stilo, E è il modulo elastico, R è il raggio del palpatore e H è la durezza Vickers del materiale. Se l'indice di danno risulta maggiore di uno allora lo stilo deforma il materiale in maniera plastica, il danneggiamento è irreversibile, viceversa se il valore è inferiore all'unità allora la deformazione è elastica.

- una unità motorizzata, opportunamente controllata elettronicamente, che provvede a fare eseguire la corsa di esplorazione l_t . Tale corsa è costituita da un tratto l_v nella fase iniziale, dal tratto di misura vero e proprio l_m la cui lunghezza è pari a 5 volte la lunghezza d'onda di taglio λ_c , e da un tratto finale ancora una volta pari a l_v . In genere tra le varie lunghezze abbiamo le seguenti proporzioni:

$$l_m = 5/7 l_t$$

$$l_v = 1/7 l_t = 1/5 l_m = \lambda_c$$

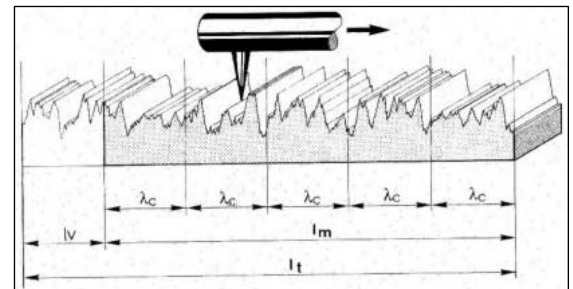
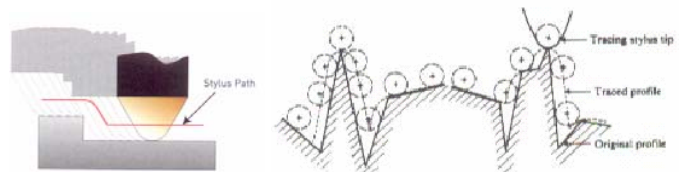
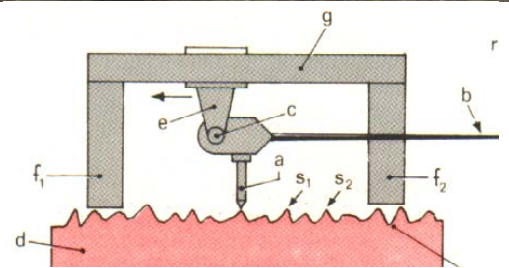
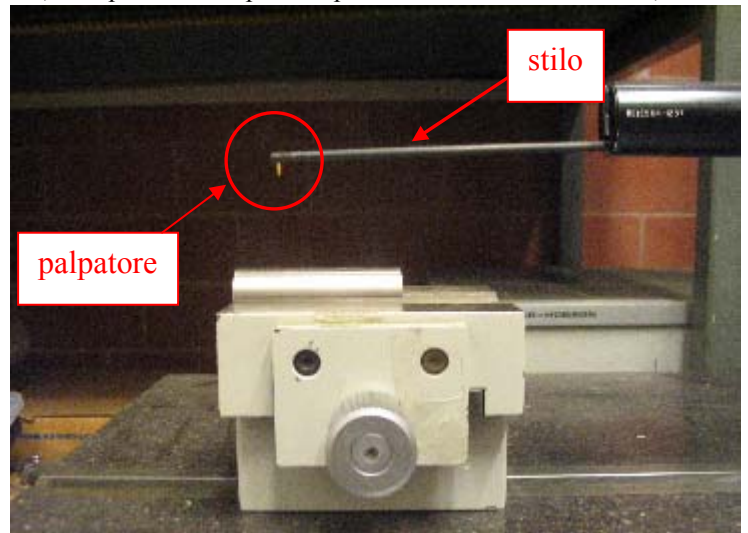
Nella figura a lato non è indicato l'ultimo tratto pari a l_v , sempre presente nella corsa dello stilo quando il filtro è di tipo gaussiano. È importante che il moto dello stilo sia uniforme in modo da stabilire un legame tra microgeometria della superficie e le frequenze contenute nel segnale proveniente dal trasduttore, ed è proprio per questo motivo che il tratto iniziale e quello finale della corsa dello stilo vengono eliminati

- un amplificatore che amplifica il segnale proveniente dal trasduttore che trasforma il moto verticale dello stilo in un segnale elettronico.

- un convertitore A/D (analogico/digitale) che campiona il segnale amplificato a intervalli regolari e lo memorizza in una memoria RAM. A ogni profilo rilevato corrisponde quindi una serie di valori numerici, rilevati in punti equamente spaziatati.

- un sistema di filtraggio digitale necessario per separare l'informazione relativa alla rugosità da quella relativa all'ondulazione

- una unità elettronica che oltre a stampare i profili molto ingranditi, calcola, visualizza e stampa i vari parametri calcolati sui due profili.

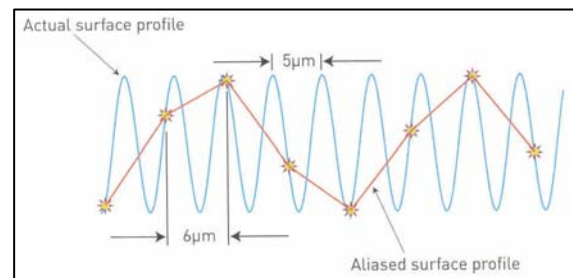


Risposta in frequenza e digitalizzazione del segnale

La frequenza del segnale prodotto da uno strumento che analizza una traccia superficiale dipende da due fattori importanti: la velocità della traversa e la spaziatura tra le linee che si stanno misurando. In generale possiamo dire che la risposta in frequenza di uno strumento deve essere alta abbastanza per registrare tutte le informazioni disponibili e questo lo deve fare senza creare distorsioni.

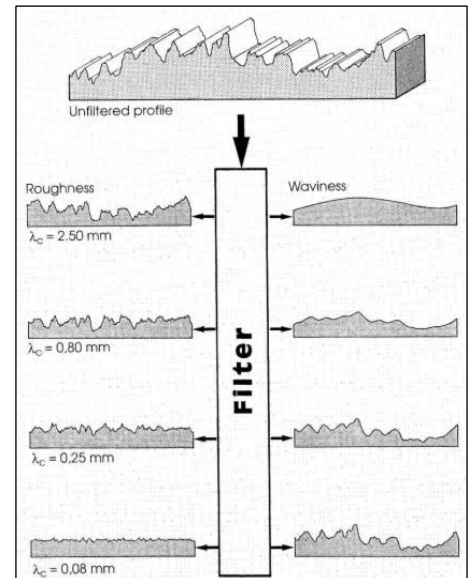
Bisogna anche accennare all'importanza della digitalizzazione del segnale. In particolare ci sono un numero di aspetti di questo processo che devono essere capiti per interpretare correttamente i dati provenienti dallo strumento. Due fattori influiscono in maniera decisiva: il cosiddetto "range to resolution" e la frequenza di campionamento. Il primo non è altro che il rapporto tra la più piccola caratteristica misurabile e il campo di misura;

come regola generale si può dire che se uno strumento ha una certa risoluzione esso non può dare informazioni valide su superfici con R_a più piccola del doppio della risoluzione. E' chiaro poi che anche un campo di misura piccolo limita di molto la capacità di un rugosimetro. Infine trattando della frequenza di campionamento possiamo vedere cosa accade nel caso non si campioni in maniera sufficiente. L'effetto è quello di avere un cosiddetto "aliased surface profile". Nella misura di superfici la norma ISO 3274 specifica che la spaziatura minima tra le linee della superficie deve essere cinque volte la spaziatura tra i punti campionati, abbiamo così definito la λ_S .



Generalità sui filtri

Quando il palpatore segue tutte le asperità e i solchi di una superficie non fa altro che memorizzare e riportare la superficie effettiva percorsa. Pertanto la misura che compie uno strumento a contatto diretto non è altro che una misura di profilometria, cioè l'insieme di tutte le componenti in frequenza del segnale che ha ricevuto, dalle alte che individuano la rugosità fino ad arrivare alle più piccole per individuare gli errori di forma. Il ruolo del filtro è quello di separare nella maniera migliore possibile le varie componenti di un profilo. Prima di passare a parlare dei vari tipi di filtro conosciuti e utilizzati, è necessario introdurre il concetto di lunghezza di campionamento o lunghezza d'onda di taglio, più volte citata in precedenza anche col nome di cut-off. Prendendo in considerazione la superficie rappresentata nella figura a lato **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si può notare, come prima detto, che essa rappresenta una certa rugosità innestata su un'ondulazione, sovrapposta a sua volta su un errore di forma. Se sulla figura detta si esplora un tratto di superficie di lunghezza uguale a λ_r ciò significa che viene ricavata soltanto l'informazione contenuta in detto intervallo della tessitura primaria e viene eliminato l'effetto della tessitura secondaria e l'errore di forma. La lunghezza λ_r viene chiamata lunghezza di campionatura o di taglio. se invece si esamina un tratto di superficie con



lunghezza di campionatura uguale a λ_o , si conteggiano insieme le irregolarità di tessitura primaria e quelle secondarie, viceversa considerando una lunghezza di esplorazione pari a λ_f si tengono in considerazione tutti e tre gli errori prima discussi. La scelta del valore di λ più adatto a separare la rugosità dall'ondulazione corrisponde a scegliere la frequenza di taglio del filtro che agisce sul segnale digitalizzato. La scelta di un cut-off giusto in relazione alla superficie esaminata è fondamentale per avere informazioni esatte sulla rugosità, possiamo notare dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** quanto cambino rugosità e ondulazione di un profilo al variare di λ_c .

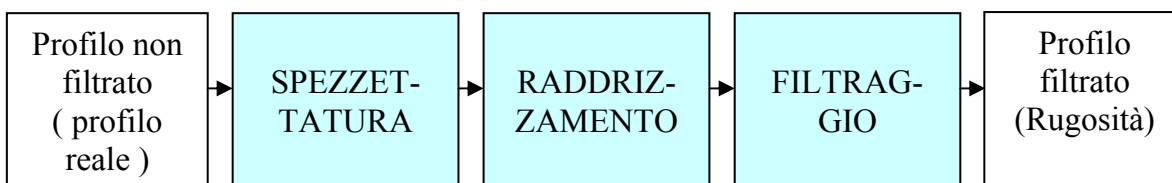
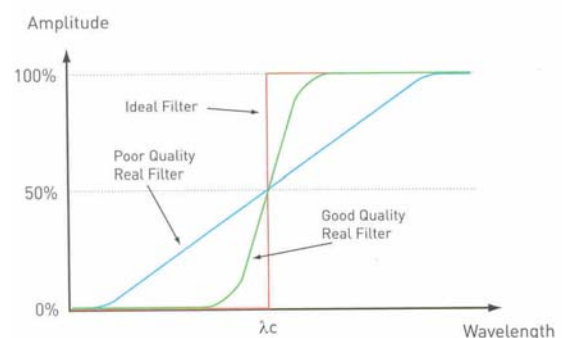
Periodic Profiles	Non-Periodic Profiles		Cut-off	Roughness Sampling Length	Roughness Evaluation Length
	Rz (μm)	Ra (μm)			
Spacing Distance RSm (mm)			lc (mm)	lr (mm)	ln (mm)
0.013 - 0.04	To 0.1	To 0.02	0.08	0.08	0.4
0.04 - 0.13	0.1 - 0.5	0.02 - 0.1	0.25	0.25	1.25
0.13 - 0.4	0.5 - 10	0.1 - 2.0	0.8	0.8	4.0
0.4 - 1.3	10 - 50	2 - 10	2.5	2.5	12.5
1.3 - 4.0	50	10	8	8	40.0

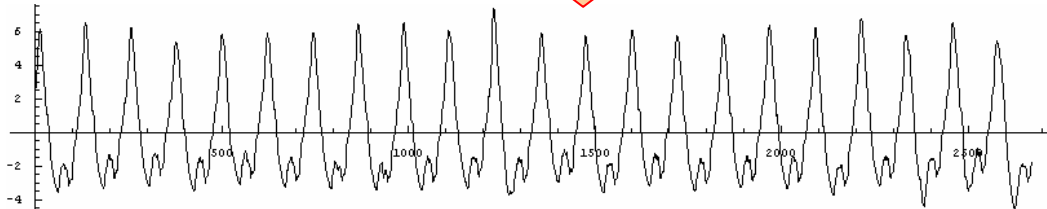
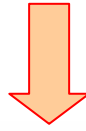
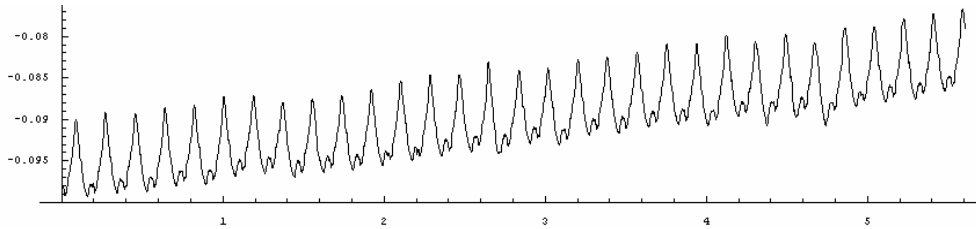
Nella pratica si fa riferimento alla tabella a lato (ISO 4288) e si procede per tentativi osservando la superficie da esaminare e ipotizzando in quale range di valori possa rientrare la Ra da misurare dopodiché si entra nella tabella con quel valore e si ricava λ_c . A questo punto si esegue la misura e si verifica se il valore di Ra ottenuto rientra effettivamente nel range prima ipotizzato, se la risposta è sì la misura di Ra è corretta altrimenti si deve ripetere la misura scegliendo il cut-off corrispondente al range in cui rientra la misura sbagliata.

Tornando a parlare del filtro diciamo che, una volta fissata la frequenza di taglio, il suo comportamento è ideale se riesce a comportarsi come la linea rossa nella figura sotto.

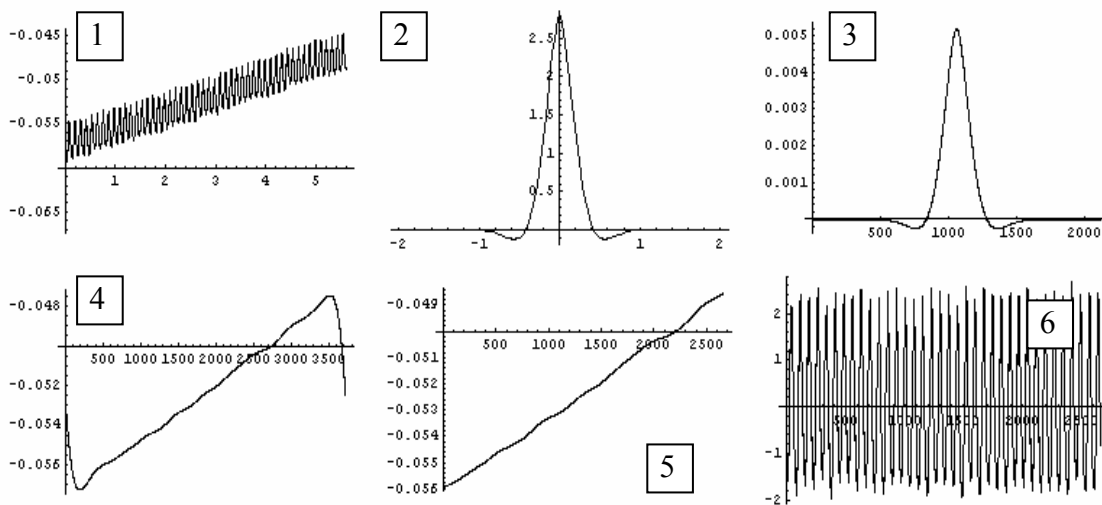
I filtri possono essere di diversi tipi: 2RC, gaussiano o gaussiano corretto. Il tipo 2RC è un filtro passa alto che blocca i segnali a bassa frequenza eliminando l'effetto dell'ondulazione e dell'eventuale errore di forma, lasciando passare solo quelli corrispondenti alla rugosità. Per le misure relative all'ondulazione invece si usa un filtro passa basso. Di solito questo tipo di filtro provoca degli sfasamenti tra segnale di rugosità e linea media, con possibili errori nel calcolo di alcuni parametri. Il filtro gaussiano consiste nel sostituire al valore di ogni punto del profilo una media pesata, calcolata su un insieme di valori nell'intorno del punto stesso, utilizzando una funzione peso con andamento "a campana". Il filtro così ottenuto è un passa basso e il numero di punti impiegati per calcolare la media pesata ne determina la frequenza di taglio e quindi il valore di λ_c .

Il filtro gaussiano corretto è un tipo di filtro che non introduce una variazione di fase nel risultato di filtraggio. Una misura di rugosità può essere schematizzata tramite il seguente black-box:





Un esempio di applicazione del filtro ISO 16610 è il seguente:



Al profilo in ingresso (1) viene sottratto il profilo (5) per ottenere la rugosità (6). Il profilo (5) è stato ottenuto effettuando una convoluzione discreta dell'(1) con la funzione discretizzata (3) ricavata dalle norme e togliendogli gli effetti di bordo indesiderati (4 → 5).

BIBLIOGRAFIA

- [ISOxx] ISO 1302, "Indication of surface texture in technical product documentation", 2002
 ISO 3274, "Nominal characteristics of contact (stylus) instruments", 1996
 ISO 4287, "Terms, definitions and surface texture parameters", 1997
 ISO 4288, "Rules and procedures for the measurement of surface Roughness using stylus instruments", 1996
 ISO 5436-1/-2, "Material measures", "Software measurement standards", 2000 2001
 ISO 11562, "Metrological characteristics of phase correct filters", 1996
 ISO 13565-1, "Filtering and general measurement conditions", 1996
 ISO 16610-22, "Terminology and concepts of spline filters", 2003
 [Tho99] Thomas T.R., "Rough Surfaces, 2nd ed.", Imperial College Press, London '99
 [GS00] F. Giusti, M. Santochi, "Tecnologia Meccanica e Studi di Fabbricazione", Casa Editrice Ambrosiana, Milano 2000
 [Met82] Metal Handbook, Ninth Edition, Volume 5, "Surface Cleaning Finishing and Coating", ASM, 1982
 [Tay03a] Taylor Hobson, "Exploring Surface Texture", 2003
 [Tay03b] Taylor Hobson, "High Precision 2D & 3D Metrology", 2003