

A close-up photograph of a metallic surface, likely aluminum, featuring a fine grid pattern. The surface is covered in numerous fine, intersecting scratches that create a complex texture. A bright, diagonal highlight runs across the right side of the image, emphasizing the metallic sheen and the grid structure.

La superficie come funzione

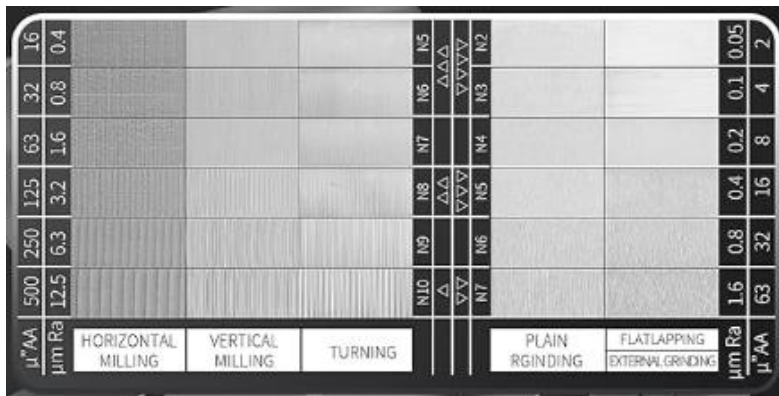
Perché la ISO21920 cambia il modo di
progettare la rugosità

Sandro Valenza

ISO 21920 La superficie come funzione

Il tramonto della vecchia norma e la crisi del paradigma 2D

Per oltre trent'anni la rugosità delle superfici è stata una disciplina apparentemente semplice, ridotta a una manciata di parametri che qualunque progettista sapeva indicare sul disegno e qualunque officina sapeva controllare con strumenti poco più sofisticati di un micrometro. In numerose officine, la rugosità veniva, e in alcuni casi viene ancora valutata in modo empirico:



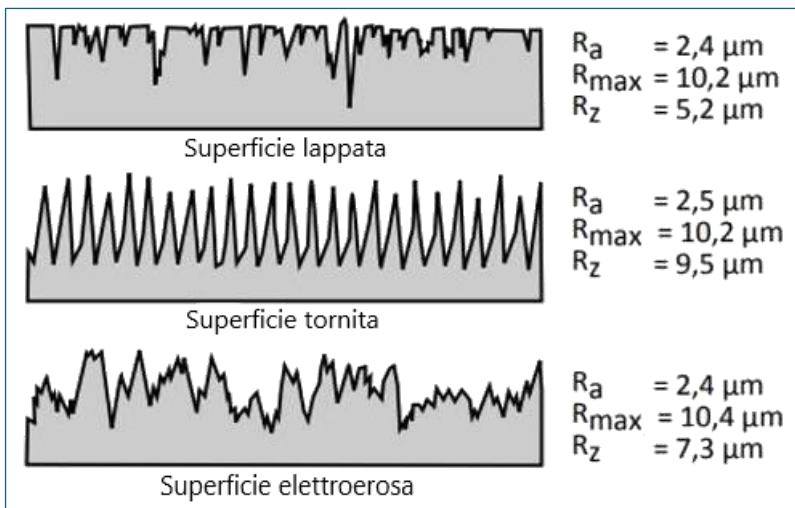
al tatto, a vista, confrontando la superficie con piastrine campione. Un metodo rapido, intuitivo, figlio di una cultura tecnica consolidata, ma inevitabilmente soggettivo e limitato. Ra, Rz, Rt: tre simboli capaci di condizionare scelte di finitura, cicli di lavorazione, costi di produzione e, in molti casi, perfino il giudizio di conformità di un pezzo. Per un'intera generazione di tecnici,

erano diventati una sorta di alfabeto minimo con cui descrivere una superficie senza dover entrare nei dettagli della sua reale morfologia. Questo funzionava in un mondo industriale molto diverso da quello di oggi, fatto di processi meno variabili, macchine utensili più lente, geometrie più semplici e tolleranze meno spinte.

La vecchia serie ISO 4287/4288/1302 nasceva da quel contesto. Un'epoca in cui la superficie veniva ancora considerata come un semplice risultato estetico delle lavorazioni, più che come un elemento funzionale dotato di proprietà fisiche complesse. Il concetto stesso di rugosità era percepito come una grandezza “di contorno”, qualcosa che si aggiungeva al progetto per dare un'indicazione generica sulla qualità della finitura. Era una visione semplificata, ma coerente con i mezzi dell'epoca. I profilometri a puntina restituiscono un profilo, una linea, un tratto isolato della superficie. L'intero impianto normativo era costruito attorno a questa idea: se misuri bene una riga, allora hai un buon indizio sulla superficie complessiva. Nessuno avrebbe osato chiamarla una rappresentazione perfetta, ma si pensava che fosse sufficiente. La meccanica era più indulgente, meno spinta verso i limiti dimensionali e funzionali, più tollerante alle approssimazioni.

Oggi nulla di tutto questo è più vero. La superficie di un componente meccanico è diventata un elemento critico, spesso determinante per la sua funzionalità. Lo è per gli accoppiamenti di tenuta, lo è per le superfici di scorrimento, lo è per le zone che devono distribuire carico, trattenere lubrificante, garantire adesione o impedire percorsi preferenziali a un fluido. Le superfici sono diventate entità complesse, profondamente diverse a seconda del processo che le genera e della funzione per cui sono destinate. La produzione moderna, con le sue rettifiche a logica adattiva, i suoi processi ad alta velocità, le lavorazioni multiasse e soprattutto l'additive manufacturing, genera superfici che non possono più essere descritte da un singolo valore medio. La superficie è una topografia, non un numero.

Il limite più grande della vecchia norma non era la sua struttura, né i valori che proponeva, ma la sua incapacità intrinseca di rappresentare questa complessità. Un parametro come R_a , per quanto



comodo, è una media assoluta delle deviazioni da un profilo ideale. Una media è rassicurante: produce un valore facilmente leggibile, comparabile, comunicabile. Ma è anche una trappola: nasconde la forma dei picchi, la distribuzione delle valli, la direzione della lavorazione, l'ordine o il disordine del pattern superficiale. Due superfici possono avere lo stesso R_a e comportarsi in modi radicalmente opposti, come spesso accade nei casi più difficili di tenuta statica o di scorrimento sotto carico.

Distribuzione delle creste a parità di R_a

La direzione stessa della lavorazione, un parametro di enorme influenza sul comportamento funzionale della superficie, sfugge completamente alla misurazione tradizionale. Un profilometro 2D è cieco davanti alle anisotropie: se la traccia di misura è perpendicolare ai solchi, registra una rugosità elevata; se è parallela, restituisce valori inspiegabilmente più bassi. La stessa superficie può "sembrare" ora ruvida, ora liscia, senza che nulla sia cambiato, se non la direzione della misurazione. Questo è un limite concettuale, non strumentale: la 2D è inadeguata perché misura una linea, mentre la superficie è un campo.

La crisi del paradigma 2D è emersa con particolare evidenza quando i progettisti hanno iniziato a spingere sull'affidabilità degli accoppiamenti di tenuta. I moderni motori, le macchine idrauliche, le pompe industriali e le trasmissioni richiedono superfici che non solo "siano lisce", ma che impediscano al fluido di trovare percorsi preferenziali. Eppure, in molti casi, superfici perfettamente conformi a R_a presentavano trafiletti inspiegabili. È un problema che chi lavora sul campo ha visto più di una volta: basamenti che trasudano nonostante i valori di rugosità sembrano impeccabili, flange che perdono olio anche se la rettifica ha rispettato le specifiche, superfici per adesivi che non garantiscono la resistenza prevista.



In SVS Micromeccanica abbiamo incontrato diversi casi simili. Il più emblematico riguardava una serie di basamenti fresati a CNC, con una finitura di $1,0-1,2 \mu m$ di R_a , apparentemente perfetta per ospitare un sigillante semi-fluido. Le misurazioni 2D, eseguite in più punti e in più direzioni, non mostravano difetti evidenti. La linea di produzione era convinta che la superficie fosse corretta. Eppure, al collaudo, alcuni motori presentavano micro-trafiletti d'olio in zone precise e ripetitive. La causa non era evidente fino a quando non è stata eseguita una misurazione tridimensionale della superficie. La 3D non ha restituito un numero: ha restituito una mappa, una

topografia completa. E in quella mappa si vedevano chiaramente microcanali longitudinali continui generati dall'ultimo passaggio di fresatura. Canali invisibili per la 2D, perché un profilo lineare non li intercettava sempre, ma devastanti per la funzione della superficie. La soluzione è stata banale e rivoluzionaria allo stesso tempo: una passata di finitura incrociata che spezzasse la continuità dei solchi.

Questo esempio racconta meglio di qualsiasi teoria perché la direzionalità è un parametro decisivo della rugosità. Una superficie non è solo "ruvida": è ruvida in una certa direzione, con una certa regolarità e con una certa continuità. Il comportamento tribologico di una superficie dipende dal modo in cui i suoi picchi e le sue valli sono distribuiti nello spazio. La portanza di una superficie piana dipende da quanti picchi effettivamente portano il carico e da come si deformano, non solo dalla loro altezza. Il comportamento di un sigillante dipende dalla presenza o meno di reticoli chiusi, non dal valore medio della rugosità. La scorrevolezza di una guida dipende dalla densità dei plateau, (zone relativamente piatte e ampie della superficie che stanno all'incirca alla stessa quota) non dalla somma assoluta delle deviazioni. Tutte queste proprietà sono tridimensionali. Nessuna è descrivibile da un singolo numero.

Con questo bagaglio di limiti, incoerenze e rischi latenti, la vecchia norma era diventata sempre più un vestito stretto, inadatto a vestire una meccanica che aveva ormai cambiato forme, velocità, esigenze e precisioni. La serie ISO 4287/4288 era rimasta ferma a un mondo in cui la superficie era un dettaglio, mentre l'industria chiedeva una superficie che fosse un protagonista. Serviva un nuovo linguaggio, un nuovo modo di pensare, una nuova prospettiva sulla rugosità, che smettesse di descriverla come un contorno e iniziasse a descriverla per quello che è: una proprietà funzionale complessa, tridimensionale e determinante per il successo di un componente.

Questo linguaggio oggi esiste. È la ISO 21920.

La forza della ISO 21920 non risiede soltanto nei nuovi parametri che introduce, ma soprattutto nel modo in cui obbliga progettisti, metrologi e produttori a cambiare prospettiva. È una norma che mette al centro non più la misura, ma la funzione. Per decenni abbiamo creduto che la superficie potesse essere descritta e giudicata attraverso un profilo lineare, come se la tridimensionalità fosse un dettaglio che poteva essere approssimato. Oggi questa approssimazione non è più accettabile. E non perché sia concettualmente sbagliata, ma perché l'industria contemporanea richiede risultati che dipendono da ciò che accade nel micron, nel millimetro quadrato, nella geometria fine che governa la tribologia.

Un singolo profilo, per quanto ben acquisito, non è altro che una sezione, un taglio arbitrario. È come giudicare la forma di una montagna guardandola attraverso un unico sentiero. Si può intuire qualcosa, ma tutto ciò che sta attorno rimane invisibile. La 3D invece non intuisce: mostra. Restituisce una mappa vera, una rappresentazione completa dell'altimetria superficiale. I parametri tridimensionali S_a , S_z , S_q , S_v , S_p , S_{sk} e molti altri non sono semplici alternative ai parametri 2D, ma strumenti concettuali per descrivere la superficie nel suo insieme. Dove R_a fornisce un valore medio, S_a descrive la variazione media su tutta l'area; dove R_z stima l'altezza dei picchi e delle valli lungo un profilo, S_z racconta l'ampiezza totale della superficie intera; dove la 2D fallisce completamente nella descrizione della direzionalità, la 3D introduce indici che quantificano l'anisotropia e la presenza di orientazioni prevalenti.

La direzione della lavorazione è uno degli aspetti più fraintesi e allo stesso tempo più determinanti della rugosità. Ogni processo produttivo impone la propria firma: la tornitura crea solchi circolari, la fresatura segna la superficie con linee parallele, la rettifica genera una tessitura più omogenea ma comunque direzionale, la lappatura crea un plateau alternato a microvalli. Queste firme, invisibili a un occhio inesperto, sono invece decisive per la funzione del componente. Una superficie con solchi continui in una sola direzione può garantire un ottimo R_a

ma può essere disastrosa in applicazioni di tenuta, perché quei solchi si trasformano in canali preferenziali per il fluido. Lo stesso Ra può invece rappresentare una superficie perfetta se la tessitura è incrociata e i microcanali non sono continui. La differenza non è nel numero, ma nella geometria.

Le misure 2D non colgono questa differenza. La 21920 sì. E lo fa non come un'aggiunta opzionale, ma come requisito concettuale di base. La rugosità tridimensionale incorpora la direzione come parametro funzionale, rendendo evidente ciò che prima era nascosto. Ogni volta che una superficie presenta una tessitura prevalente, la misura 3D la individua immediatamente. E questo è fondamentale perché, nella maggior parte delle applicazioni critiche, la funzione non dipende solo da quanto è rugosa una superficie, ma da come quella rugosità è distribuita.

La direzionalità influisce sulla tenuta, sulla lubrificazione, sullo scorrimento, sull'usura e persino sull'adesione di un sigillante. In molte applicazioni industriali, una superficie troppo liscia o troppo uniforme può essere un problema tanto quanto una superficie troppo ruvida. Una superficie eccessivamente levigata può impedire il corretto ancoraggio di un adesivo, causando distacchi improvvisi, mentre una superficie troppo ruvida può trattenere bolle d'aria o creare zone di scarsa copertura. L'idea tradizionale che "più fine è la finitura, meglio è" è profondamente sbagliata. Meglio è solo ciò che è funzionale.

La passata di finitura, considerata per decenni un gesto finale quasi estetico, si rivela oggi un'operazione funzionale da progettare con attenzione. In alcuni casi, come negli accoppiamenti basamento-coperchio o nelle superfici di tenuta senza guarnizione, è essenziale perché spezza la continuità dei solchi, riduce la direzionalità, omogeneizza il contatto e impedisce la formazione di percorsi preferenziali. Una passata di finitura incrociata può trasformare una superficie che perde in una superficie perfettamente stagna, come abbiamo sperimentato affrontando problemi di trafilamento in motori e riduttori industriali. In altri casi, però, la passata di finitura può essere controproducente: può eliminare le valli funzionali che trattengono il film d'olio in una guida, può ridurre la portanza dei picchi in un accoppiamento dinamico, può alterare la microgeometria ottenuta con una rettifica di precisione.

La 21920 non obbliga a eseguire passate di finitura: obbliga a pensare. A capire quando servono, quando non servono e quando possono danneggiare la funzione della superficie. È una norma che non detta processi, ma impone consapevolezza. È una norma che fa emergere la tridimensionalità come caratteristica intrinseca della superficie. Ora che la tecnologia ci permette di osservare la superficie in 3D, la norma ci chiede di interpretarla in 3D.

La misurazione tridimensionale non è solo una questione di accuratezza: è una questione di verità. La superficie non è più interpretata attraverso un campione, ma osservata nella sua interezza. Un profilometro ottico acquisisce milioni di punti in pochi secondi, ricostruisce la morfologia e la rende leggibile come una mappa. È possibile individuare picchi isolati, zone di plateau, direzioni prevalenti, microavvallamenti, difetti sporadici, depressioni locali o pendenze significative. È possibile capire se una superficie è funzionale a ciò che deve fare, e non se "assomiglia" a ciò che deve essere in media. Questo approccio cambia completamente il modo in cui valutiamo la qualità.

Mentre la vecchia norma si sforzava di adattarsi alla tecnologia disponibile, la 21920 nasce dalla tecnologia attuale. È una norma contemporanea, coerente con gli strumenti moderni e in armonia con il sistema GPS. Tutto ciò che descrive è misurabile con gli strumenti oggi in uso nei reparti di metrologia. I parametri tridimensionali non sono concetti astratti, ma grandezze reali, acquisite attraverso strumenti che già oggi popolano le officine più evolute. Non stiamo parlando di tecnologie del futuro, ma di tecnologie del presente che la norma ha finalmente deciso di riconoscere.

In questo senso, la ISO 21920 svolge un ruolo cruciale: elimina la dicotomia tra ciò che è misurabile e ciò che è normato. Per la prima volta dopo decenni, la norma si allinea alla pratica e ai mezzi dell'industria. E questa è una delle ragioni principali per cui i progettisti devono adottarla: perché è una norma che permette di descrivere la superficie per come la superficie è realmente, non per come eravamo costretti a immaginarla.

Eppure, la ragione più profonda, quella che va al di là della tecnologia, è che la ISO 21920 restituisce alla superficie la dignità di elemento progettuale. Non è più un dettaglio aggiuntivo, ma un aspetto funzionale da definire, controllare e sviluppare con la stessa cura con cui si definisce una tolleranza geometrica o una caratteristica funzionale complessa. Una superficie non è un valore medio: è un paesaggio microscopico che determina il comportamento macroscopico del componente.

Il passaggio dalla 2D alla 3D non è quindi un semplice aggiornamento: è un cambiamento culturale. È il momento in cui la meccanica riconosce che la superficie è una funzione, non una finitura. Che la forma fine della topografia determina la tenuta, la scorrevolezza, l'usura, il rumore, l'efficienza, la durata. Che la superficie non è più un "contorno tecnico", ma un vero protagonista nel funzionamento del componente.

Quando si osserva una superficie con gli occhi della ISO 21920, si scopre che ciò che conta veramente non è più il valore numerico, ma il comportamento. La superficie smette di essere un semplice risultato estetico di una lavorazione e diventa un attore funzionale. La sua topografia determina il modo in cui un componente si accoppia, scorre, sigilla, si usura, trasferisce calore, dissipa energia o resiste a sollecitazioni ripetute. È un cambiamento radicale, perché costringe a guardare la superficie non solo come un oggetto da misurare, ma come un fenomeno da comprendere.

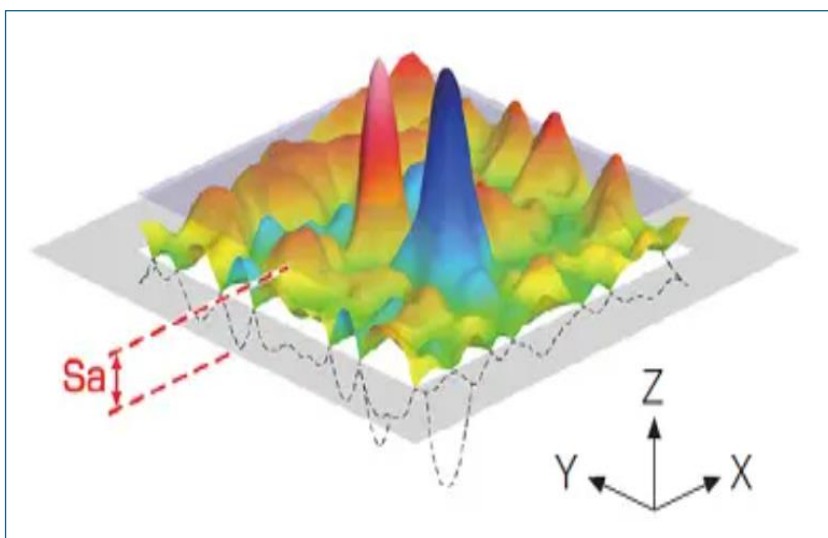
Una delle lezioni più importanti che la 21920 impone al progettista è che non esiste una "buona rugosità" in senso assoluto. Esiste una rugosità funzionale. Una superficie che garantisce una tenuta perfetta può essere totalmente inadatta a uno scorrimento idrodinamico. Una superficie ideale per incollaggio può risultare pessima per un accoppiamento in pressione. Una superficie troppo liscia può impedire la distribuzione corretta di un sigillante, mentre una superficie troppo ruvida può trattenere bolle o impedire l'adesione completa. È un paradosso solo apparente: la rugosità è buona quando è adeguata alla funzione.

Nella progettazione tradizionale, questa distinzione era difficilmente applicabile, perché mancavano gli strumenti concettuali e normativi per descrivere la superficie in modo adeguato. La ISO 4287, con i suoi parametri monodimensionali, poteva indicare un grado di finitura, ma non una morfologia. Non poteva distinguere una superficie con picchi distribuiti uniformemente da una superficie con picchi isolati ma profondi. Non poteva riconoscere una superficie con direzionalità elevata da una superficie isotropa. Non poteva indicare la presenza di plateau reali, né l'equilibrio tra portanza e lubrificazione. La norma, in altre parole, non era in grado di dire al progettista se la superficie avrebbe funzionato davvero.

La 21920, invece, introduce un linguaggio capace di esprimere queste differenze. E apre al progettista una nuova responsabilità: quella di progettare la superficie in base alla funzione, non alla tradizione. Un progettista che continui a indicare sul disegno un Ra senza comprenderne il significato tridimensionale rischia di commettere lo stesso errore di chi progetta una tolleranza geometrica senza sapere come il pezzo sarà misurato. È un approccio ormai superato, che crea ambiguità, lascia spazio a interpretazioni arbitrarie e spesso porta a non conformità difficili da giustificare.

Il progettista moderno deve imparare a ragionare in termini di topografia. Deve capire che una superficie troppo liscia può essere dannosa, come accade per le sedi di adesivi anaerobici, dove la mancanza di microvalli riduce drasticamente l'area reale di contatto e impedisce la formazione di una pellicola omogenea. Deve sapere che una superficie troppo ruvida può produrre tensioni puntuali che compromettono la durata di un accoppiamento a fatica. Deve riconoscere che una direzionalità eccessiva può trasformare una superficie compatibile con la tenuta in un potenziale percorso di fuga per un fluido. Deve ricordare che picchi troppo isolati possono generare concentrazioni di carico, mentre una tessitura a plateau riduce l'usura iniziale e migliora il comportamento nel tempo.

Il passaggio alla rugosità 3D permette di valutare questi aspetti, ma soprattutto permette di progettargli. E qui la 21920 mostra tutta la sua potenza: non è una norma che impone di usare certi parametri; è una norma che fornisce gli strumenti per capire come una superficie deve essere fatta affinché svolga correttamente il suo ruolo. Il progettista può decidere di specificare S_a se deve valutare la variazione media; può decidere di usare S_z per tenere sotto controllo i picchi estremi; può ricorrere a S_dq per limitare le pendenze e prevenire attriti eccessivi; può usare S_{sk} per descrivere l'asimmetria della superficie e quindi la sua capacità di portanza; può indicare S_{dr} per valutare la superficie sviluppata reale rispetto all'ideale. Per ogni funzione esiste un parametro più adatto. Per ogni parametro esiste una ragione tecnica.



Media aritmetica delle altezze (S_a)

Questo parametro estende il parametro del profilo R_a (rugosità lineare) tridimensionalmente. Rappresenta la media aritmetica dell'ordinata assoluta Z , X , Y nell'area di valutazione.

Nota

Rappresenta uno dei parametri usati più frequentemente ed è la media aritmetica della differenza media delle altezze del piano medio. Fornisce dei risultati affidabili visto che il parametro non è significativamente influenzato da graffi, contaminanti e rumore della misura.

Chi lavora nelle officine, nelle aziende metalmeccaniche e nei reparti qualità sa quanto sia frequente il caso in cui un pezzo apparentemente conforme a R_a si riveli in realtà problematico in montaggio o in esercizio. È una storia comune nelle produzioni di flange, basamenti, coperchi, sedi di guarnizione, orizzontamenti di riduttori, superfici adesive. La causa non è quasi mai il valore medio della rugosità, ma la morfologia tridimensionale. Nel caso dei basamenti che trafilavano olio, la soluzione non è stata "fare R_a più basso", ma modificare la passata di finitura per rompere la continuità della direzionalità. Nel caso delle superfici adesive che non garantivano tenuta, la soluzione non è stata ridurre la rugosità, ma introdurre una tessitura che aumentasse la superficie di contatto effettiva. Nel caso delle superfici rettificate che producevano vibrazioni inattese, la soluzione non è stata migliorare la planarità, ma eliminare picchi isolati rilevabili solo nella mappa tridimensionale.

Si tratta di casi reali che dimostrano come la superficie sia un'entità funzionale e non un valore estetico. In questo senso, la 21920 non impone al progettista nuovi obblighi, ma gli offre una nuova possibilità: progettare con consapevolezza, non per abitudine. Una superficie non deve essere "bella": deve essere adatta alla sua funzione. E per essere adatta, deve essere compresa nella sua forma reale.

Anche la passata di finitura, in questo nuovo modo di pensare, assume un ruolo diverso. Non è un'operazione da compiere in modo automatico, ma una scelta progettuale. Una passata di finitura incrociata può essere fondamentale per la tenuta, ma dannosa per la lubrificazione. Una finitura troppo levigata può peggiorare il comportamento di un accoppiamento dinamico, mentre una finitura più rugosa ma ben distribuita può offrire prestazioni superiori. La funzione guida il processo, non la tradizione.

Questa transizione richiede un nuovo approccio mentale. Richiede progettisti pronti a ragionare in termini tridimensionali, tecnologi capaci di comprendere la relazione tra processo e topografia, metrologi in grado di interpretare mappe e non solo grafici, officine preparate a controllare non solo il valore medio ma l'intera forma della superficie. Richiede, soprattutto, una cultura della superficie che l'industria non ha mai avuto e che oggi deve acquisire.

La ISO 21920 è lo strumento che rende questa cultura possibile. Non è un obbligo, ma un'opportunità. È la possibilità di creare superfici progettate, non solo lavorate. È la possibilità di eliminare problemi storici, di ridurre contestazioni, di garantire prestazioni più elevate e più costanti. È la possibilità di portare la progettazione meccanica a un livello più alto, dove la funzione guida ogni scelta e la superficie diventa un elemento progettuale con la stessa dignità delle quote e delle tolleranze geometriche.

La rugosità non è più un numero. La rugosità è un paesaggio. Un mondo microscopico che determina il comportamento macroscopico del componente. Un universo tridimensionale che ora possiamo misurare, descrivere e controllare con una precisione che fino a pochi anni fa era impensabile. Con la ISO 21920, quel mondo diventa finalmente leggibile. E una volta che lo si vede per com'è davvero, tornare indietro non è più possibile.

La superficie non è più una linea: è un mondo intero. E per leggerlo serve la norma giusta. È per questo che oggi, più che mai, **è ora di cambiare davvero.**



✉ info@svsmicromeccanica.com

🌐 www.svsmicromeccanica.com

