



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.A. 2020/2021

Sessione di Laurea Luglio 2021

Metodi di misura topografici per la caratterizzazione del danno d'usura da *fretting* e in applicazioni *low- wear*

Valutazione dell'incertezza estesa dei metodi e confronto delle
performance metrologiche, computazionali e delle difficoltà
implementative

Relatori:

Prof. Galetto Maurizio

Candidato:

Vasilios Niarchos
259193

Indice

Introduzione	5
1 Il problema dell'usura e analisi tribologiche di due applicazioni studiate	7
1.1 Caso studio 1: banco prova di un albero scanalato e danno da fretting	8
1.1.1 Danno da <i>fretting</i>	9
1.1.2 Usura da <i>fretting</i> e fatica da <i>fretting</i>	11
1.1.3 Regimi di scorrimento del <i>fretting</i>	15
1.2 Caso studio 2: Caratterizzazione dell'usura del composito SiC-Al eseguita con un test tribologico PIN-ON-DISC (configurazione lineare).....	18
1.2.1 Generalità sui Metal Matrix Composites: SiC-Al	20
1.2.2 Proprietà tribologiche SiC-Al	23
2 Algoritmi di <i>Computer vision</i> per l'analisi dell'usura.....	27
2.1 Speeded Up Robust Features (SURF).....	28
2.1.1 Fast-Hessian Detector	29
2.1.2 SURF Descriptor	32
2.2 Iterative Closest Point (ICP)	34
3 Metodi topografici per la caratterizzazione dell'usura	38
3.1 Strumenti di misura utilizzati per le misurazioni topografiche	40
3.1.1 Metodi a contatto	41
3.1.2 Metodi a non contatto	42
3.1.3 <i>Coherence scanning interferometry</i> -principi	44
3.2 Analisi della topografia superficiale.....	49
3.2.1 <i>Filtering</i>	49
3.2.2 Parametri 3D della <i>texture</i> superficiale.....	52
3.3 Metodi volumetrici basati sulle misure della topografia superficiale.....	60
4 Valutazione dell'incertezza del volume di usura	63
4.1 Introduzione.....	63
4.2 Metodi per la determinazione dell'incertezza	65
4.2.1 L'incertezza di categoria A e categoria B	65
4.2.2 Legge della propagazione dell'incertezza	66
4.2.3 Calcolo dell'incertezza estesa.....	68
4.3 Procedura di taratura di un interferometro a luce bianca	69
4.3.1 Rumore di misurazione N_M	70
4.3.2 Deviazione di planarità Z_{FLT}	71
4.3.3 Coefficiente di amplificazione, deviazione di linearità e perpendicolarità.....	73
4.3.4 Risoluzione W_R	75
4.4 Incertezza legata alla procedura di calcolo dell'usura (registrazione e sottrazione)	76
4.5 Valutazione dell'incertezza del volume di usura.....	77
4.5.1 Metodo automatico basato sulla topografia superficiale	77
4.5.2 Metodo dei parametri volumetrici	79

5 Materiali e Metodi	81
5.1 Caso studio 1: Denti dell'albero scanalato	81
5.1.1 Applicazione algoritmi Computer Vision: registrazione mediante ICP tradizionale	82
5.1.2 Caratterizzazione del volume di usura con i metodi topografici 3D	88
5.1.3 Incertezza dello strumento	93
5.1.4 Test di ipotesi per confrontare i metodi	94
5.2 Caso studio 2: caratterizzazione usura provino piano SiC-Al	96
6 Risultati	101
6.1 Caso studio 1: caratterizzazione volume usura del Dente1, Dente6, Dente11	101
6.1.1 DENTE1 (D1)	101
6.1.2 DENTE6 (D6)	107
6.1.3 DENTE11 (D11)	113
6.2 Caso studio 2: Caratterizzazione usura provino piano SiC-Al	119
7 Conclusioni	128
8 Bibliografia e Sitografia	131

Introduzione

La valutazione precisa del danno da usura ha acquistato una rilevanza notevole nel campo della ricerca, in quanto costituisce la base per lo sviluppo di modelli predittivi da applicare nella progettazione dei componenti di macchina e nell'ottimizzazione di nuovi materiali e processi di produzione. Una caratterizzazione precisa è diventata importante soprattutto in applicazioni dove il danno da usura è su piccola scala. Ad esempio, l'evoluzione delle soluzioni tecnologiche e della progettazione meccanica dal punto di vista della potenza, riduzione di peso, comportamento dinamico, hanno portato spesso al superamento di alcuni problemi applicativi relativi ai cedimenti classici statici o per fatica, ma hanno reso critiche nuove tipologie di danneggiamento, legate a fenomeni su scala micrometrica, tra cui quello per *fretting*; perciò lo studio dei fenomeni permette progettazioni in qualità in termini di affidabilità e sicurezza. Un altro esempio di applicazione *low-wear* è lo sviluppo di nuovi compositi con rinforzi in particelle ceramiche per utensili e mole abrasive, il cui studio del comportamento all'usura è alla base del miglioramento di processi tecnologici termo-meccanici in cui vengono applicati questi materiali, per controllare la resistenza dell'utensile, il risparmio energetico, il costo e l'efficienza.

Pertanto, l'esigenza di quantificare il danno totale di usura è diventata particolarmente sentita nel mondo industriale non solo per i motivi sopracitati, ma anche nell'ottica dell'Industria 4.0 e dell'economia circolare: il fenomeno è connesso allo strisciamento tra corpi e alla frizione, dunque influenza l'efficienza energetica e una sua diminuzione permette un miglioramento in termini di sostenibilità ambientale.

In particolare, in questo lavoro si è affrontata la sfida della misurazione dell'usura su piccola scala in due applicazioni molto diverse: un tribo-test lineare (test di modello) effettuato su un provino di un composito SiC-Al, ed uno specifico a banco prova per la valutazione del danno da fretting sul fianco dei denti di un albero scanalato. Il focus degli studi non è stato l'analisi del significato tribologico delle caratterizzazioni quanto la misurazione dell'usura stessa con le metodologie opportune. Per raggiungere questo scopo è stato necessario, infatti, effettuare la valutazione utilizzando le tecniche basate sulla misurazione della topografia superficiale, mediante un microscopio ottico topografico (interferometro *CSI*), in quanto queste tecniche permettono ispezioni ricche di informazioni e ad alta risoluzione. Per queste applicazioni, infatti, i metodi tradizionali standard basati sulla profilometria superficiale e le tecniche gravimetriche risultano essere meno adeguati, poiché sono molto meno robusti e con performance metrologiche inferiori.

Dunque, in prima battuta si è ricostruito il framework della caratterizzazione del volume totale di usura per i metodi basati sulla topografia superficiale e in questo contesto sono stati indagati gli algoritmi di *Image Processing* e *Computer Vision* su cui tali approcci si basano: l'implementazione degli algoritmi di registrazione 3D è necessaria, infatti, per comparare le nuvole di punti topografiche catturate dall'interferometro prima e dopo usura.

In seconda battuta, sulla base della recente produzione scientifica, è stato riprodotto il quadro per la valutazione dell'incertezza di misura dei metodi basati sulla topografia superficiale, in accordo con gli standard degli strumenti di misura topografici (le loro caratteristiche metrologiche), con gli algoritmi di registrazione utilizzati (propagazione dell'errore residuo) e in accordo con l'operazione

di sottrazione delle superfici topografiche pre- e post-usura (composizione dei contributi di incertezza delle misure).

Questo ha permesso di effettuare confronti delle performance metrologiche nella quantificazione del volume del danno di usura tra il metodo automatico (*MountainsMap*) e il metodo dei parametri volumetrici (Abbott-Firestone) e, inoltre, ha consentito di analizzare la presenza di *errore sistematico* o meno tra i due metodi topografici e di individuare quali fattori influenzano possibili differenze sistematiche. Come vedremo, il tipo di topografia, intesa come distribuzione delle altezze, ha un impatto in questo.

Un ultimo obiettivo del lavoro è stato quello di quantificare l'impatto degli algoritmi di *features recognition* (in particolare l'algoritmo *SURF*) usati a supporto degli algoritmi di registrazione 3D delle *point clouds* (*Iterative Closest Point, ICP*) per migliorare le stime del volume di usura dei metodi topografici. Questo ultimo studio è stato applicato al caso del composito SiC-Al perché facilitato dalla forma piana del provino analizzato.

Nello specifico, la tesi è articolata in sette capitoli: nel primo capitolo vengono introdotte le generalità sull'usura e i suoi meccanismi, all'interno di un *framework* teorico che contestualizza le caratteristiche tribologiche dei due casi studio analizzati nel lavoro sperimentale. In particolare, vengono evidenziate le differenze tra i tribo-test eseguiti, viene descritto il fenomeno del *fretting* e il comportamento tribologico del composito SiC-Al analizzato. Il secondo capitolo descrive il funzionamento teorico semi-quantitativo degli algoritmi di *Computer vision* per la *features detection* nelle immagini e la registrazione di *point clouds 3D*, applicati nello studio e preliminari alla caratterizzazione del volume d'usura. Il terzo capitolo affronta la caratterizzazione del volume di usura mediante approcci topografici; in particolare, viene definito il misurando, gli strumenti topografici in generale con un focus sul CSI, vengono descritti gli strumenti di analisi di una topografia come il filtraggio e i parametri topografici, e, infine, sono presentati i modelli matematici analitici per la caratterizzazione del volume di usura. Il quarto capitolo, invece, mostra il calcolo dell'incertezza per i metodi topografici analizzati, dopo aver ripreso i concetti chiave per la valutazione dell'incertezza e analizzato la valutazione delle caratteristiche metrologiche del CSI.

Infine, vengono illustrati i 'Materiali e Metodi', 'Risultati' e 'Conclusioni' delle due applicazioni sperimentali proposte.

1 Il problema dell'usura e analisi tribologiche di due applicazioni studiate

La tribologia è definita come la scienza che studia i fenomeni legati a superfici interagenti sottoposte a moto relativo e sotto carico, come l'attrito, l'usura e la lubrificazione.

Ad oggi, circa il 30% del consumo mondiale di energia viene utilizzato per superare l'attrito e nella maggior parte dei componenti meccanici, l'usura è responsabile di un gran numero di guasti (3). Sebbene in alcuni casi il componente usurato possa essere sostituito prima del guasto, i costi economici associati all'usura superano il 5% del PIL dei paesi sviluppati (3). Sia l'attrito che l'usura, sono fenomeni superficiali che devono essere adeguatamente indagati per ridurre tali costi. Ma oltre ad aspetti puramente economici, l'obiettivo dello studio e della quantificazione del fenomeno d'usura può essere ancorato a target di efficienza energetica e sostenibilità ambientale. Tuttavia, per loro natura, i fenomeni tribologici sono molto complessi, generalmente irreversibili, si evolvono nel tempo e quindi sono altamente sistemici.

Si definisce *usura* la progressiva rimozione di materiale dalla superficie di un corpo solido che possiede un moto relativo rispetto ad un altro solido o ad un fluido. Si tratta di un fenomeno complesso naturale e inevitabile, per il quale è essenziale tenere in considerazione le condizioni di contatto (strisciamento, rotolamento, impatto, *fretting*), e lo stato di deformazione conseguente alla sollecitazione (deformazione elastica/plastica). Inoltre, all'interno di questa fenomenologia si possono distinguere diversi meccanismi di usura: usura adesiva (Adhesive wear), usura abrasiva (Abrasive wear), usura per fatica (Fatigue wear), usura corrosiva (Corrosive wear).

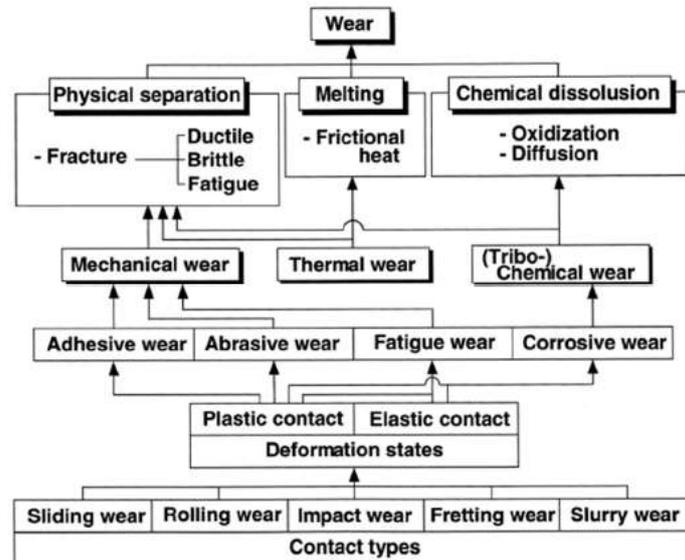


Figura 1.1 schematizzazione delle diverse condizioni e diversi meccanismi che generano usura.

L'usura colpisce le superfici dei corpi delle macchine provocando un progressivo decadimento delle performance della macchina e provocando una dissipazione dell'energia per attrito. Quindi ogni diminuzione di tale fenomeno risulta considerabilmente vantaggiosa, anche se, in alcune applicazioni, è intenzionalmente voluta (2). Analizzando i guasti nelle macchine si scopre come nella maggior parte dei casi la rottura e l'arresto sono associati a interazioni tra parti in movimento come ingranaggi, cuscinetti, giunti, camme, frizioni, sigillanti, ecc.

In molte situazioni, l'usura tra due superfici interagenti può essere controllata da parte dei progettisti attraverso un'opportuna *texture superficiale*, l'ingegnerizzazione di superfici (ad esempio depositando film sottili oppure producendo rivestimenti multistrato) oppure la lubrificazione, aumentando così le performance in termini di resistenza all'usura (7-8).

La valutazione dell'usura attraverso la caratterizzazione del suo volume è importante in questo contesto, in quanto assume un ruolo diagnostico, permettendo così di verificare le scelte progettuali per una specifica applicazione e il corretto sfruttamento delle proprietà funzionali desiderate. Vengono ad esempio valutati la correttezza della selezione di materiali per le interfacce, dei lubrificanti, del processo di preparazione delle superfici (trattamenti termici, chimici o meccanici) (7).

Segue un quadro teorico che approfondisce i due casi studio analizzati nel lavoro sperimentale da un punto di vista fenomenologico e tecnologico. Le due applicazioni sono molto diverse, infatti, e fanno riferimento una ad un test di usura su un componente meccanico (albero scanalato) eseguito mediante un banco prova, e l'altra si riferisce ad un test su materiale (composito SiC-Al) di uso tecnologico eseguito tramite un test Pin-on-Disk (configurazione lineare). Le due applicazioni perciò differiscono per tipologia di tribo-test (complessità, specificità e rappresentatività delle condizioni di lavoro, costi e riproducibilità), per materiale e forma macro-geometrica dei provini, e soprattutto tipologia di condizioni di contatto che determinano una manifestazione diversa del danno da usura (in un caso fretting, nell'altro strisciamento a secco). In entrambi i casi però siamo di fronte ad applicazioni di *low-wear* a cui devono essere applicati i medesimi metodi di indagine per la valutazione del volume d'usura.

1.1 Caso studio 1: banco prova di un albero scanalato e danno da fretting

L'obiettivo del primo caso studio è stata la caratterizzazione del *fretting* nel caso di un componente reale come un accoppiamento scanalato, caratterizzato da geometrie complesse. In particolare, il disallineamento tra gli assi dell'albero e del mozzo α , come mostrato in Fig. 1.2, è la causa del danneggiamento da *fretting* che si manifesta sui fianchi dei denti (9-11).

La coppia torcente trasmessa T è bilanciata dalla reazione F che agisce su ogni dente a contatto. Trascurando le componenti assiali e radiali della Forza F , la componente tangenziale, normale alla superficie, è quella che determina lo sviluppo delle pressioni di contatto tra le due superfici che ingranano (il calcolo della pressione e dell'orma di contatto può essere approssimato con la teoria di Hertz). Il disallineamento del montaggio causa la presenza di scorrimento relativo δ tra i due corpi, favorendo la formazione delle condizioni tipiche per l'innesco del fenomeno del *fretting* (11).

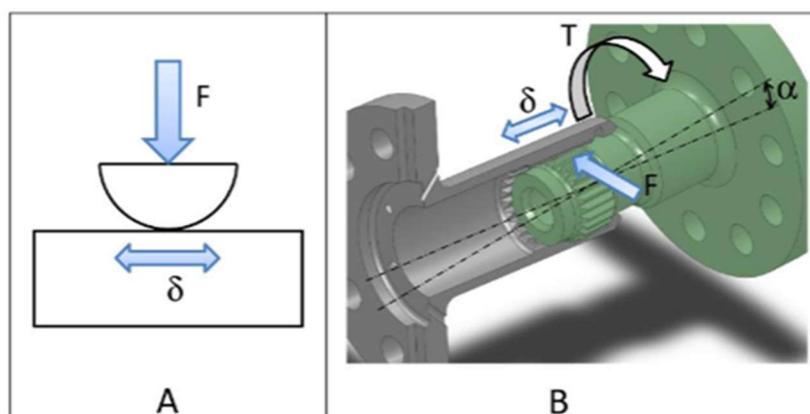


Figura 1.2 Modello dinamico per l'analisi del fretting del dente dell'albero scanalato (a sinistra); Rappresentazione CAD dell'accoppiamento replicato con il Bench test (a destra) (10)

L'accoppiamento è stato soggetto a un banco prova per scanalati (Bench tests). Questa tipologia di tribo-test è tra le più complesse, meno ripetibili e difficili da eseguire, assieme ai test sul campo (Field tests), ma la più vicina a specifiche applicazioni di interesse (4). Nonostante la complessità e il costo, questo tipo di test è necessario per le valutazioni tribologiche di sistemi meccanici come questo e viene eseguito per lunghi periodi e in condizioni rappresentative delle reali condizioni di lavoro: è possibile impostare parametri come momento torcente, velocità di rotazione, ore di lavoro, numero di cicli di lavoro ed infine il disallineamento angolare, oltre ovviamente monitorare le condizioni ambientali. La prova da banco è preferibile comunque, in termini di costo e tempo, ai modelli FEM che vengono utilizzati per tenere conto di tali problematiche, i quali sono particolarmente dispendiosi.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi però, più che fare valutazioni di carattere progettuale dei componenti (stabilendo relazioni tra le condizioni al contorno, geometria dell'accoppiamento, materiali e cedimenti) è quello di applicazione metodologica delle procedure di calcolo del volume d'usura con i metodi topografici 3D, ed è volto a fornire un'incertezza di misura a queste caratterizzazioni, per renderle comparabili. Queste procedure verranno riportate nei capitoli successivi. Infatti, al misurando non può essere attribuito il singolo valore stimato, la misura è influenzata da numerosi fattori di carattere aleatorio e alcuni fattori sistematici residui non eliminabili, alcuni idiosincratici del sistema di misura. Pertanto, è necessario fornire sempre stime intervallari con un certo livello di fiducia.

1.1.1 Danno da *fretting*

Il *fretting* è un fenomeno che si verifica quando due superfici a contatto strisciano con un moto oscillatorio di piccola ampiezza, cioè compreso tra 1 e 100 μm (la definizione può essere estesa sino a 300 μm secondo alcuni studiosi), dopo un elevato numero di cicli (68). Il concetto di 'piccola ampiezza' del moto deve essere rapportato alla larghezza del contatto; infatti, si parla di semplice scorrimento relativo se l'ampiezza del moto è maggiore o uguale alla larghezza del contatto.

I progressi progettuali e tecnologici sono tali per cui i cedimenti classici statici o per fatica dei componenti di macchina sono stati quasi del tutto eliminati ma sono diventate critiche nuove tipologie di danneggiamento, tra cui quella per *fretting*. Infatti, questo può provocare cedimenti gravi dei componenti, intaccandone completamente la funzionalità (9). Perciò l'esigenza di comprenderlo e definirlo è diventata particolarmente sentita nel mondo industriale (aerospaziale, biomedico) per poter controllare il *fretting* al livello di progetto, garantendo così, maggior sicurezza e affidabilità, evitando la sostituzione preventiva prematura di componenti di macchina, e riducendo i costi derivanti dalle conseguenze dei danni provocati.

Data l'estrema complessità del problema, non esistono ancora delle procedure standardizzate per poterlo quantificare e prevedere. I problemi pratici del *fretting* sono particolarmente gravosi, infatti, contatti che sembrano essere privi di movimento (contatti statici), come accoppiamenti con interferenza, permettono movimenti relativi dell'ordine dei micron quando sono applicati carichi alternati e oscillanti, oppure semplicemente per la presenza di vibrazioni esterne. Tali movimenti sono molto difficili da eliminare e il risultato a cui portano è il *fretting*. In più c'è una difficoltà diagnostica, in quanto di solito il danno è nascosto e l'ispezione spesso è possibile solo in seguito a

disassemblaggio (12). Casi di accoppiamenti classici in cui troviamo il fenomeno sono scanalati, collegamento mozzo-albero per interferenza, chiavette, anelli dei cuscinetti.

Non c'è approccio uniforme per prevedere e aggirare i problemi in fase di progettazione, e molto probabilmente molti problemi di *fretting* che emergono non sono diagnosticati come tali. A volte danni da sfregamento in un determinato luogo può portare a cambiamenti radicali nel carico dinamico dell'intero sistema meccanico (il danno anche di entità lieve causa la formazione di giochi inammissibili), determinando un guasto finale in una posizione lontana dal sito del danno da *fretting* (12).

Quindi accade che componenti verificati, con grande margine di sicurezza, sia per fatica che dal punto di vista statico, siano soggetti a tale fenomeno che una volta manifestato, è irreversibile e degenerativo. La severità del fenomeno comunque, dipende da una serie di fattori che devono essere presi in considerazione.

I fattori possono essere divisi in tre categorie: le condizioni di contatto, le condizioni ambientali, e le proprietà e comportamento dei materiali; questi interagiscono l'uno con l'altro fino a produrre il meccanismo e definirne la magnitudo. Spesso la complessità del fenomeno non ci consente di identificare, in condizioni d'uso del sistema, l'insieme di fattori che l'hanno provocato (12).

Le condizioni di contatto si riferiscono al carico di contatto, l'ampiezza, la frequenza del movimento e la geometria del contatto. Le condizioni ambientali includono umidità relativa, temperatura, presenza di lubrificazione e potenziale chimico. Infine, il materiale influenza il fenomeno con le sue proprietà meccaniche (durezza, resistenza, limite di fatica) e chimiche (ossidazione, corrosione, proprietà adesive).

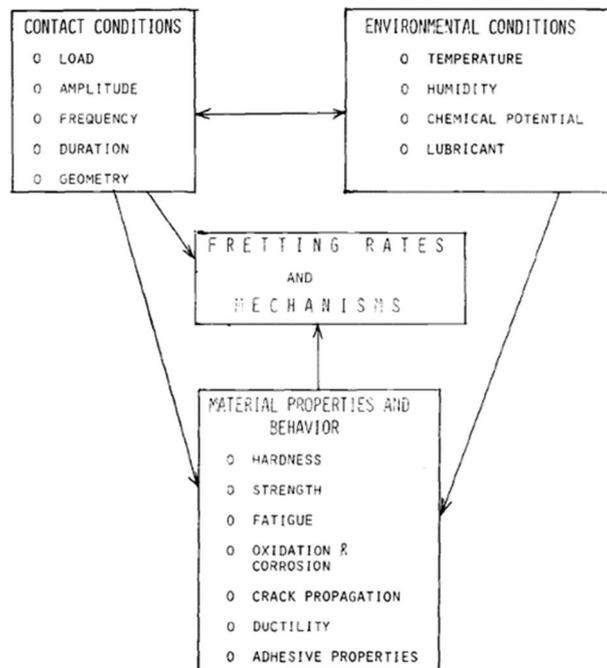


Figura 1.3 Fattori che impattano sul tasso di usura

La letteratura scientifica ha proposto però la formulazione di procedure di verifica del danno da *fretting* solo per modelli di contatto assolutamente elementari (sfera-piano ad esempio), in cui valgono anche se con approssimazione, le formulazioni analitiche relative all'orma e pressioni di

contatto hertziano. Molto più complessa, invece, è l'indagine del fenomeno nel caso di componenti reali, con geometrie non semplici, come l'evolvente di cerchio negli accoppiamenti scanalati: il disallineamento tra gli assi dell'albero e del corrispondente mozzo, causa sul fianco dei denti questo danneggiamento, fino a rendere necessaria la sostituzione dell'intero accoppiamento.

Il fretting si può suddividere in due categorie in base ai meccanismi del fenomeno: l'**usura da fretting** (la perdita di materiale) e **fatica da fretting** (la generazione di una cricca superficiale). In realtà spesso sono presenti simultaneamente ma solo uno dei due è la causa del cedimento del componente a seconda di quale sia prevalente. L'ampiezza dello spostamento relativo e l'entità della forza di contatto hanno un ruolo cruciale in questo senso.

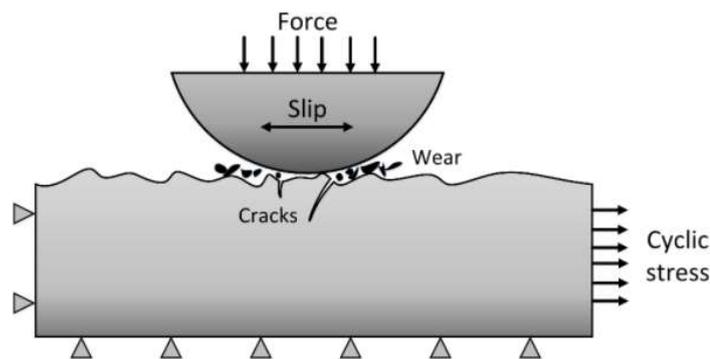


Figura 1.4 rappresentazione del danno da fretting wear e fretting fatigue sulla superficie del componente

1.1.2 Usura da fretting e fatica da fretting

1.1.2.1 Fretting wear

Il *fretting wear* (usura da fretting) è la rimozione del materiale dalle superfici di contatto attraverso l'azione del fretting. La conseguenza principale di questo è la perdita di controllo dimensionale (fuori tolleranza) in interfacce critiche che può condurre alla perdita funzionale dei componenti meccanici in un assieme. Un'altra conseguenza più specifica è nei cuscinetti a sfera, dove le piste di contatto tra il corpo volvente e l'anello vengono deformate e l'irregolarità ne altera il funzionamento. Un'altra manifestazione di cedimento usuale è il grippaggio di un giunto mobile a causa della perdita dei giochi progettati e un conseguente blocco del sistema (qui sono rilevanti meccanismi di usura chimica). Come si intuisce, l'entità del danno superficiale è molto più grande di quanto faccia pensare l'ordine di grandezza delle distanze di scorrimento. Quest'usura è identificata come la reazione del materiale ad una sua sovra-deformazione **overstraining**: è predominante nei casi in cui la forza normale è piuttosto bassa e l'ampiezza di scorrimento è alta.

I meccanismi di usura alla base del fretting wear sono di natura meccanica e chimica: usura adesiva, usura abrasiva e usura corrosiva: a causa della piccola ampiezza dello scorrimento i detriti prodotti (generati dall'usura adesiva) sono spesso trattenuti all'interno della zona di contatto accelerando il processo di usura (usura abrasiva), poi in relazione alle condizioni di lubrificazione e atmosferiche, si può innescare anche l'usura corrosiva o ossidativa.

Segue una breve descrizione di questi meccanismi fondamentali, che sono generali e prescindono dal tipo di processo di usura (*fretting* in questo caso), come mostra la Figura 1.1:

L'**usura adesiva** è un meccanismo di saldatura localizzata, che interessa soprattutto metalli ad alta saldabilità. Le superfici a contatto hanno un certo grado di rugosità, pertanto le interazioni interessano le relative asperità, le quali interagiscono sviluppando elevate pressioni di contatto localizzate; dunque, le pressioni elevate e gli aumenti di temperatura causati dal calore dissipato dall'attrito, determinano le condizioni ideali per la formazione di microsaldature. Il moto relativo di scorrimento tra i due corpi, esercitando un'azione di taglio, porta alla rottura della zona saldata, interessando la saldatura stessa oppure uno dei due materiali metallici. Se il fenomeno prosegue ciclicamente con la formazione di saldature e conseguente rottura del materiale circostante, i componenti in contatto tendono a degradarsi velocemente e in modo irreversibile (5,6).

L'usura adesiva può essere ridotta per mezzo di un lubrificante che impedisca alle superfici di saldarsi, oppure con l'accoppiamento di metalli che abbiano una bassa solubilità allo stato solido (per diminuire la resistenza delle giunzioni adesive), o con la maggiore durezza possibile (per resistere alle deformazioni plastiche locali). La presenza di ossido può essere positiva in questa circostanza.

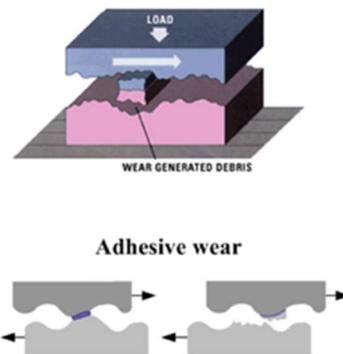


Figura 1.5 Meccanismo dell'usura adesiva

Storicamente questo meccanismo è descritto dalla teoria di Archard: nonostante, come vedremo nei capitoli seguenti, l'usura sia caratterizzata in modo sperimentale essenzialmente, c'è stato storicamente uno sforzo di trovare alcune relazioni analitiche predittive del fenomeno. Il tasso d'usura W [m^3/m], cioè il rapporto tra il volume di materiale asportato V per usura e la distanza di strisciamento s , è proporzionale all'area di contatto A :

$$W = K_{AD}A = K_{AD} \frac{F_N}{H}$$

Con K_{AD} una costante adimensionale detta coefficiente di usura adesiva (indice della severità dell'usura), H durezza superficiale (MPa), F_N forza di compressione (N). Da cui si ricava la relazione del Volume asportato per adesione:

$$V = K_{AD} \frac{F_N}{H} s$$

Dove s rappresenta il percorso di strisciamento.

Non è semplice determinare il coefficiente di usura K , il quale dipende dalle condizioni di strisciamento, di carico, ambientali e della combinazione dei due materiali a contatto.

La reazione chimica tra il materiale eroso e un agente corrosivo come un reagente chimico, un lubrificante attivo oppure l'aria è la causa fondamentale dell'**usura corrosiva**. Solitamente è l'ossigeno il principale fattore della corrosione per le superfici metalliche (in questo caso si parla propriamente di usura ossidativa): l'ambiente in cui viene a trovarsi gran parte dei sistemi tribologici è l'aria, ricca in ossigeno; nella gran parte dei casi quindi l'aggressione ambientale comporta un'ossidazione superficiale, e il meccanismo di usura che ne deriva, la tribossidazione appunto, è dato dalla combinazione del processo ossidativo e dall'azione meccanica in corrispondenza delle due superfici a contatto. I film di strato di ossido fungono da protezione dalla loro stessa generazione, impedendo la reazione di ossidazione. A causa dello strisciamento fra le superfici in moto tale protezione viene rimossa, e si ha la sua trasformazione in particelle abrasive per poi riformarsi repentinamente laddove si trova il metallo puro; questo fenomeno insieme all'azione meccanica può distruggere velocemente il materiale (5,6).

L'**usura abrasiva** si verifica quando un solido è in contatto con un altro che è costituito da particelle con una durezza particolarmente elevata e bordi taglienti (ad esempio perché rivestito con un film protettivo) mentre la controparte non è adeguatamente protetta; l'usura abrasiva si può sviluppare anche in modo molto rapido (5,6). L'aumento della durezza superficiale attraverso trattamenti termochimici come tempra, carburazione, nitrurazione, porta a una maggiore resistenza all'abrasione del componente meno sacrificabile. Anche per l'usura abrasiva è possibile utilizzare la legge di Archard, ma il coefficiente di usura abrasiva è generalmente più alto di quello adesivo.

In relazione ai materiali, ci sono diversi meccanismi che si possono innescare, alcuni anche contemporaneamente. Infatti, la rimozione del materiale si ha per microtagli, microfratture, pull-out di singoli grani o fatica accelerata dovuta alle ripetute deformazioni (5).

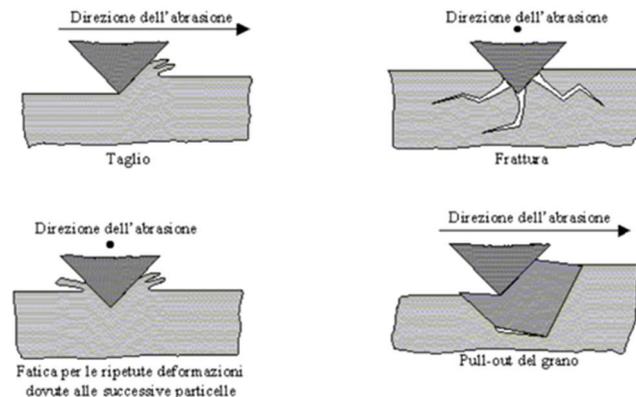


Figura 1.6. Meccanismi di rimozione del materiale in seguito ad abrasione

Il taglio è il classico modello che si usa quando le particelle o le asperità "tagliano" la superficie meno dura del pezzo. Il materiale tagliato forma il detrito dell'usura e sulla superficie si osservano molti intagli in genere di forma piramidale o sferica. Al di sotto della superficie abrasa si ha una notevole deformazione plastica, che fa incrudire il materiale con conseguente riduzione dell'usura. Nel caso di un materiale ceramico, oppure in generale fragile, si ha la frattura della superficie. In questo caso i detriti sono il risultato della propagazione delle cricche fino alla rottura. Quando un materiale duttile è soggetto ad abrasione da parte di particelle non spigolose, i fenomeni di taglio sono sfavoriti e la superficie abrasa è soggetta a deformazioni ripetute. In questo caso i detriti sono il risultato di fenomeni di fatica dei metalli.

Soprattutto i ceramici sono interessati dal fenomeno del pull-out, ovvero il distacco delle particelle di rinforzo ceramico, causata dal fatto che in questi materiali la superficie della particella

è debolmente legata, favorendo il fenomeno rapidamente. In questo caso l'intera particella diventa detrito.

Una delle caratteristiche fondamentali del fretting è che a causa della piccola ampiezza dello scorrimento i detriti prodotti sono spesso trattenuti all'interno della zona di contatto accelerando il processo di usura. Queste particelle sono dette 'terzo corpo' e possono portare a quella che si definisce 'abrasione a 3 corpi', come mostrato in figura 1.6

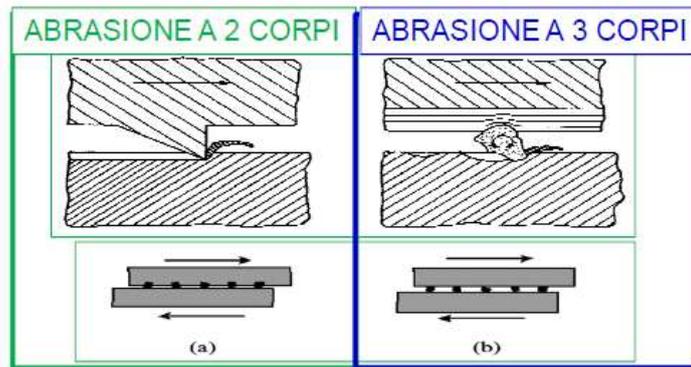


Figura 1.6. A sinistra meccanismo di abrasione a 2 corpi; a destra modello di abrasione dovuta ai detriti intrappolati (terzo corpo).

Talvolta però, l'effetto delle particelle ossidate può essere positivo, nel caso di materiali meno duri, in quanto riducono il coefficiente di attrito, reggono il carico, diminuendo così la velocità di usura (5).

1.1.2.2 Fretting Fatigue

Il fretting fatigue si manifesta quando il carico normale è elevato (*overstressing*) e l'ampiezza di scorrimento è bassa. Quando l'ampiezza di scorrimento è elevata, infatti, le cricche che si enucleano in superficie vengono eliminate dall'usura, ancor prima che queste inizino a propagarsi, riducendo la sezione resistente del componente e causando una rottura di schianto fragile finale (13,14).

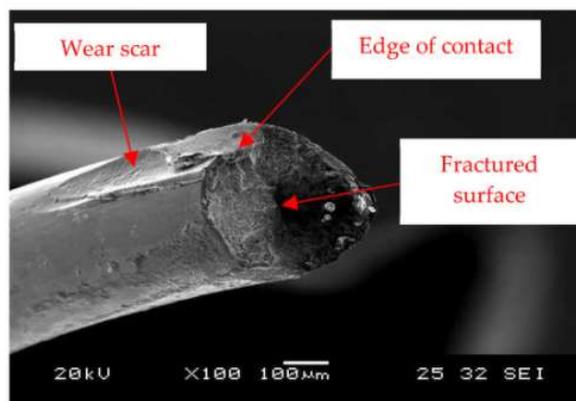


Figura 1.7 Morfologia di una superficie di rottura a seguito della fatica da fretting.

La nucleazione avviene nella zona sub-superficiale come conseguenza di una sovrasollecitazione periodica, in prossimità del contatto, mentre la propagazione si ha nella direzione in cui la sollecitazione è massima (in direzione 45 gradi), verso l'interno del materiale (13,14).

La figura 1.8 mostra lo stato tensionale tipico di un contatto cilindro-cilindro (ingranaggi) e spiega perché si innesca la cricca: dalle pressioni di contatto si sviluppa nel materiale uno stato tensionale bidimensionale o tridimensionale complesso. Nella zona di contatto, la compressione porta il materiale a dilatarsi trasversalmente, ma la dilatazione è impedita dal materiale circostante inferiore che opera come un vincolo. Questo meccanismo fa sì che la tensione generata raggiunge i suoi valori massimi in una zona sub-superficiale, infatti si calcola la tensione equivalente ad una certa quota rispetto la superficie del materiale (17).

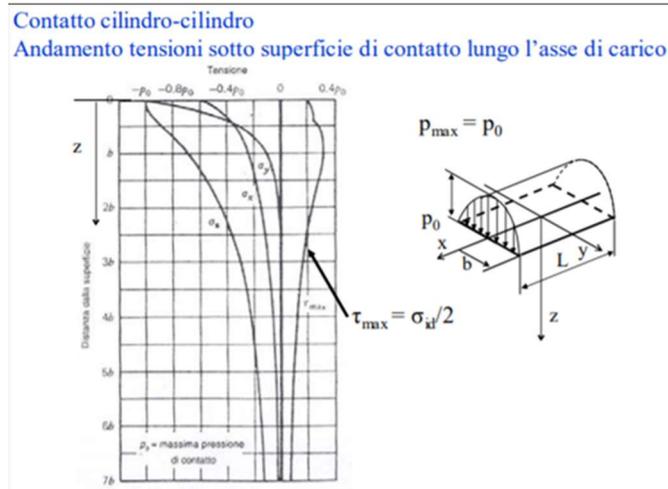


Figura 1.8. Stato tensionale triassiale di un contatto cilindro-cilindro.

Rispetto alla fatica classica, per quanto riguarda il limite di fatica del componente, il fretting fa nucleare cricche precocemente e a tensioni inferiori a causa della concentrazione di tensioni legate al contatto nella zona di scorrimento. Inoltre, il fretting è sfavorito da superfici con grandi asperità, in quanto queste consentono di avere minori punti di contatto, mentre nella fatica classica per allungare la vita del componente, sono utilizzate lavorazioni superficiali che mirano a lucidare la superficie. Un'altra differenza riguarda i tempi delle 3 fasi del cedimento (nucleazione, propagazione, rottura): nella fatica classica circa il 90% della vita utile è speso per la nucleazione, nel fretting solamente il 5% (13,14).

1.1.3 Regimi di scorrimento del fretting

La tipologia del danno da fretting è strettamente correlata alle condizioni di scorrimento tra i due corpi, infatti a seconda dell'ampiezza di scorrimento abbiamo un cedimento meccanico diverso (vedi figura 1.9). I regimi di scorrimento dipendono essenzialmente dall'ampiezza del moto relativo e possono essere classificati in tre tipologie (16): *partial slip regime PSR*, *gross slip regime GSR* e *mixed regime MR*. Quest'ultimo è semplicemente un'alternanza temporale tra i due regimi estremi, i quali sono analizzati di seguito: il GSR iniziale, a causa dell'usura e conseguente aumento del

coefficiente di attrito, si evolve in PSR, perciò sarà caratterizzato da ampiezze di scorrimento intermedie.

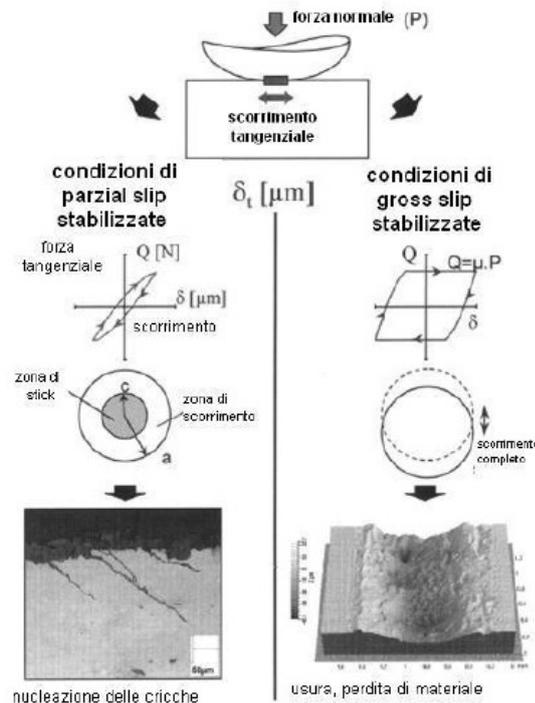


Figura 1.9 Effetto del danneggiamento da fretting in funzione dell'ampiezza di scorrimento

Nel caso di piccole ampiezze di scorrimento si evidenzia il PSR, caratterizzato dall'aver una zona centrale di adesione (zona di stick) dove non si manifesta scorrimento, e una zona anulare esterna con scorrimento di entità ridotta. Proprio questo tipo di regime di moto determina il *fretting fatigue*: le cricche nucleano nella zona di passaggio tra la zona stick e la zona di scorrimento; il profilo di pressione in quei punti mostra un massimo, il che implica un'intensificazione dello stato tensionale triassiale del substrato in corrispondenza di quei punti (15). Poi le cricche hanno modo di propagare fino al cedimento del componente per fatica. Pertanto, come mostra la figura 1.10, analizzando la profondità di usura di un contatto hertziano in funzione della posizione, nel PSR l'usura si manifesta solo nella corona esterna, poiché solo lì è presente scorrimento. Nella zona di stick, invece, la pressione di compressione è minima e non si verificano fenomeni interessanti (15).

Il GSR non ha una distinzione in zone in base al moto relativo, poiché le ampiezze di scorrimento sono elevate e tutti i punti del corpo in contatto sono in moto relativo. Il cedimento caratteristico di questo regime di scorrimento è il *fretting wear*: in questo caso il profilo di pressione per un contatto hertziano è massimo nella zona centrale, e determina un volume di usura paraboloidale rilevante, con vertice nel punto centrale dell'orma di contatto (15). L'asportazione di materiale è così elevata che spazza via tutte le cricche che cercano di nucleare ma danneggia la superficie irreversibilmente. Questo può portare a una perdita di funzionalità dell'accoppiamento.

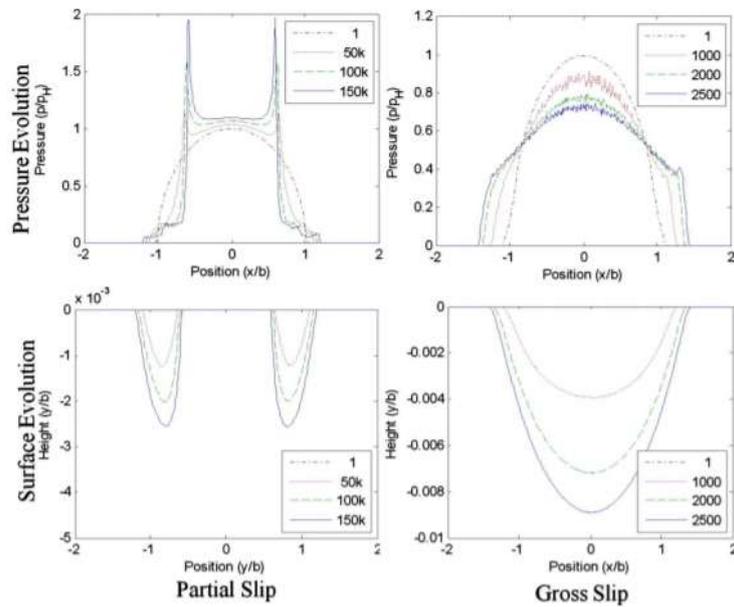


Figura 1.10 Distribuzione delle pressioni e profondità dell'usura per un contatto hertziano in PSR e GSR

Grazie all'approccio *fretting mapping*, frutto dei lavori pubblicati nell'ultimo ventennio, ad oggi si è in grado di riconoscere e prevenire già in fase iniziale le due tipologie di danneggiamento sopra citate. Conoscendo il carico normale e l'ampiezza di scorrimento si riesce a prevedere i cedimenti meccanici associati ai vari regimi analizzati. Le mappe di risposta sono molteplici, con diverse suddivisioni e tracciamento delle curve di separazione (in funzione dei materiali in contatto e dell'ambiente esterno), ricavate in modo sperimentale (15). Un esempio è quella riportata in figura 1.11 dove si nota che per ampiezze di scorrimento basse e condizioni di *overstressing* ci si ritrova in PSR, mentre col crescere del δ e con la diminuzione dello sforzo normale si passa in MR ed GSR.

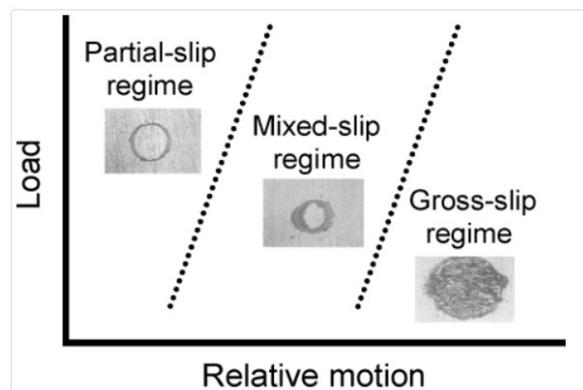


Figura 1.11 Esempio di fretting mapping

1.2 Caso studio 2: Caratterizzazione dell'usura del composito SiC-Al eseguita con un test tribologico PIN-ON-DISC (configurazione lineare)

Il secondo caso studio invece, sempre con lo scopo di applicare gli approcci metodologici basati sulla topografia superficiale, è volto ad analizzare il comportamento tribologico di una materiale tecnologico di grande interesse applicativo (non più un componente) come il composito SiC-Al, il quale presenta una matrice metallica di Alluminio e particelle rinforzanti di SiC.

La caratterizzazione dell'attrito e dell'usura (tassi di usura e resistenza all'usura) dei materiali viene tipicamente eseguita utilizzando vari tipi di tribo-test, tra questi il Pin-on-Disk è certamente il più utilizzato, per la sua relativa semplicità e per la moltitudine di contatti tribologici che possono essere descritti dal semplice movimento del perno sul disco (27).

Il Pin-on-Disk viene utilizzato per molteplici applicazioni; tra queste il suo utilizzo è rilevante per supportare il settore aerospaziale, automobilistico e aeronautico nella caratterizzazione di nuove leghe a bassa densità e ad alta resistenza (come Leghe Mg-Al-Si-Zn), materiali compositi (Compositi a matrice metallica) e rivestimenti come i Cermets, ovvero dei compositi con particelle rinforzanti in cui la fase metallica è minoritaria in volume ma agisce comunque da matrice per i carburi (WC, TiC), nitrucci (TiN) o ossidi (TiO₂, Al₂O₃) (18,19,20).

Il Pin-on-Disk, al contrario del Bench Test eseguito per l'albero scanalato, è un 'Test di Modello' (Model Test) e nonostante la sua semplicità, il suo utilizzo è estremamente importante: ad oggi c'è una tendenza a ridurre le dimensioni degli elementi di macchina, ridurre la manutenzione, incrementare le prestazioni e aumentare l'affidabilità, queste propensioni richiedono soluzioni innovative in termini di progettazione, ma testare queste soluzioni sul campo a livello di intera macchina, potrebbe essere molto costoso sia in termini economici che temporali. Pertanto, le configurazioni di test semplici universali sono spesso usate per indagini tribologiche, soprattutto in fase di prototipazione.

Inoltre, i Model Tests sono molto utilizzati per la ricerca come nella scienza dei materiali, dove è rilevante una standardizzazione delle procedure per poter fare opportune analisi comparative tra i vari risultati di ricerca, infatti permettono un'elevata riproducibilità dei parametri di prova, diminuendo le incertezze dei risultati derivanti da scelte arbitrarie di setup delle prove (4).

Il test in genere consente di testare diverse modalità del moto di scorrimento: unidirezionali, regimi del fretting e recentemente anche schemi più complessi. Gli standard di riferimento per questi test sono ASTM G99 e ASTM G133 (26, 69).

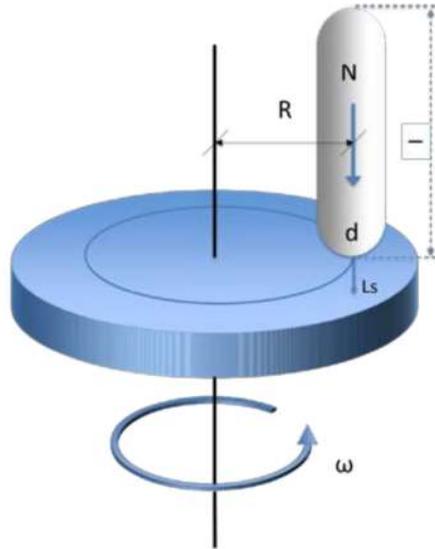


Figura 1.12 Schema di un test Pin-on-Disc con traccia di usura circolare.

Lo schema del test Pin-on-Disc è illustrato in Figura 1.12. Il perno stazionario viene premuto contro il disco rotante (con una certa velocità angolare ω) sotto il carico dato N , ad una certa distanza radiale R dal centro del sistema.

Il perno può essere di qualsiasi forma, ma si prediligono quelle sferiche o cilindriche (d), per la loro facilità di allineamento; mentre i perni piatti, essendo soggetti a problemi di disallineamento, possono provocare carichi non uniformi e complicare così trattazioni teoriche. Durante il test, la forza di attrito, l'usura e la temperatura vengono costantemente monitorate. Il test può essere eseguito con lubrificazione oppure a secco. Nel primo caso è il pin che viene immerso in un bagno di lubrificante.

Dopo un certo numero di cicli impostato, il test termina e si può passare all'elaborazione dei dati attraverso diverse tecniche di analisi, come l'analisi della topografia superficiale per determinare il volume di usura, il tasso di usura e l'evoluzione della rugosità superficiale durante il test (le tracce di usura possono essere analizzate come vedremo utilizzando sistemi di imaging come profilometri ottici, microscopi a forza atomica, interferometri a luce bianca ecc.). Ancora, si può effettuare l'analisi della composizione chimica e delle particelle mediante microscopia elettronica a scansione e raggi X, tribofilm e analisi microstrutturali. Nel caso di lubrificazione, si può effettuare l'analisi dei detriti presenti nell'olio, che può essere correlata al volume o alla velocità di usura. In questo caso si utilizza un contatore di particelle e si effettua un'analisi spettrometrica del lubrificante grazie ai quali si può quantificare la percentuale, le dimensioni e gli aspetti chimici delle particelle (27).

Nonostante in prima battuta il test sembra essere molto semplice, ci sono molti fattori che possono influenzare i risultati, inoltre bisogna tener conto che la configurazione del test dovrebbe avvicinarsi il più possibile al contatto reale tribologico che si vuole analizzare. I fattori che devono essere considerati per la progettazione opportuna del test sono: la forma del pin, allineamento del pin, materiale del pin, posizione del pin (parte superiore o inferiore del disco).

Altri test simili, in cui valgono gli stessi principi, sono ad esempio le prove perno su anello, perno su piatto, sfera su piatto; le uniche differenze sono nella geometria del tribometro specifico e del pin. In particolare, il pin-on-plate con traccia di usura lineare è quello utilizzato per la caratterizzazione del composito SiC-Al.

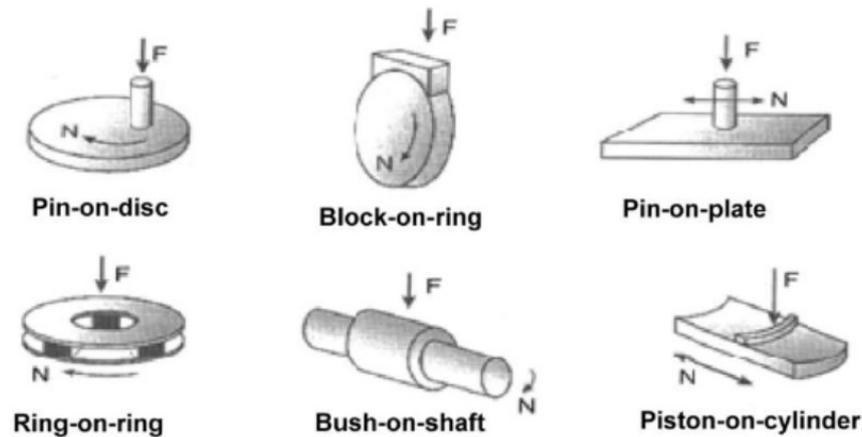


Figura 1.13 Configurazioni comuni di tribotest.

1.2.1 Generalità sui Metal Matrix Composites: SiC-Al

I materiali compositi a matrice metallica negli ultimi anni sono stati oggetto di un grande interesse per la ricerca. Questi, infatti, offrono proprietà termomeccaniche superiori rispetto ai materiali monolitici, combinando caratteristiche come ad esempio alta resistenza, leggerezza, alta tenacità e resistenza a temperature elevate e in ambienti corrosivi, che nei materiali monolitici non sono raggiungibili tutte assieme. Tra questi, i materiali con matrice di Alluminio (Lega leggera) e particelle ceramiche sono tra i più utilizzati per l'industria aerospaziale e automotive, per le ottime proprietà meccaniche e tribologiche che garantiscono un elevato rapporto resistenza/peso, una buona colabilità e formabilità. Inoltre, l'Alluminio offre una buona conducibilità termica ed elettrica (22,23).

In particolare, questi materiali sono compositi e non soluzioni solide perché sono costituiti da una matrice e da un rinforzante separati da un'interfaccia netta di spessore nullo (quindi non classificabili come fasi, le quali sono separate da bordi di grano con spessore non trascurabile), in quanto i costituenti sono insolubili l'uno nell'altro. L'interfaccia tra matrice e rinforzante deve essere progettata opportunamente, in modo che ci sia elevata bagnabilità, elevata continuità e bassa reattività tra i due materiali. Dall'interazione tra matrice-rinforzante, infatti, dipende l'azione rinforzante delle particelle o delle fibre dei compositi (23).

Spesso si scelgono le leghe leggere, come l'Alluminio, il Magnesio e Titanio, come legante perché l'uso dei compositi serve a superare i problemi di peso dei materiali tradizionali come l'Acciaio, la cui densità di $7,8 \text{ g/cm}^3$ non è adeguata a molte applicazioni. Il basso peso specifico da solo non è sufficiente per impieghi soprattutto strutturali che necessitano di resistenza a trazione e Modulo di Young elevati, pertanto si ha l'esigenza di introdurre particelle ceramiche (SiC) o fibre metalliche/ceramiche come rinforzanti. L'azione rinforzante si manifesta con il trasferimento di carico di sollecitazione meccanica dalla matrice al rinforzante attraverso l'interfaccia forte

progettata. Le particelle di SiC determinano anche un'azione tenacizzante del materiale, in quanto contrastano la propagazione delle cricche.

La proprietà che si vuole ottenere con gli MMC e in particolare gli AMC (Aluminum-Matrix-Composites) sono diverse:

- Buone proprietà meccaniche (carico di snervamento, carico di rottura, resistenza all'usura, rigidità, resistenza a fatica, tenacità, duttilità) fino a temperature medio alte (migliori delle leghe leggere): appena si alzano le temperature le proprietà meccaniche delle leghe leggere vanno a decadere, l'alluminio, infatti fonde a 660°C , pertanto 200°C potrebbero essere già tanti per compromettere il materiale;
- Migliore resistenza al creep;
- Bassa densità (migliori dell'acciaio);
- Elevata resistenza specifica (carico di rottura/densità): parametro che mi valuta contemporaneamente la caratteristica di leggerezza e resistenza a trazione;
- Affidabilità (Migliore dei ceramici): i ceramici a parte la Zirconia sono tutti piuttosto fragili, non danno sicurezza sufficiente, mentre la matrice metallica rende il composito MMC più duttile, e quindi la plasticizzazione del materiale diventa un ulteriore margine di sicurezza al cedimento.

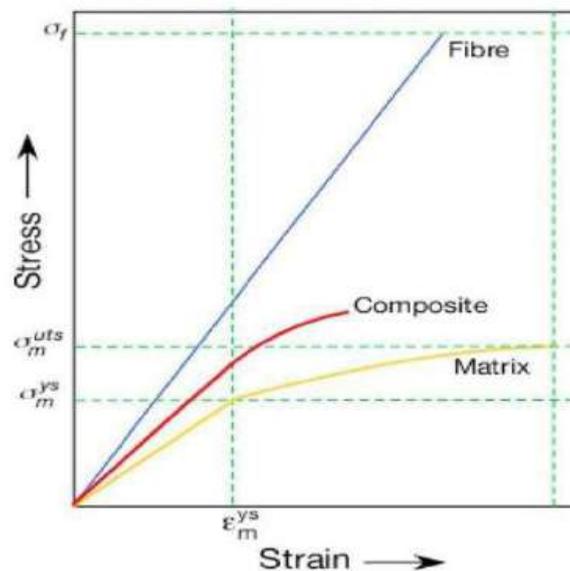


Figura 1.14. Possibile curva di trazione di un composito, la cui matrice è rinforzata con fibre.

Lo svantaggio degli AMC sono però i costi elevati e il problema del riciclo, a causa dei due materiali inglobati assieme, ed è molto difficile separarli per riutilizzarli. Però i benefici economici e ambientali, oltre alle indiscusse prestazioni, sono evidenti nel settore dei trasporti poiché si traducono in minori consumi di carburante, minore inquinamento acustico e minori emissioni nell'aria.

I compositi rinforzati con fibre (rinforzo continuo) sono i più prestazionali ma anche i più costosi perché la produzione delle fibre ha un costo elevato, infatti i compositi con rinforzi in fibra si trovano in applicazioni di nicchia soprattutto sportive. In oggetti di uso comune, è più facile avere rinforzanti di particelle, sottoforma di polveri aggiunte (rinforzo discontinuo), che offrono proprietà meccaniche inferiori ma comunque molto superiori rispetto al materiale monolitico. Il vantaggio delle particelle è la distribuzione uniforme che conferisce isotropia al materiale: ha le stesse proprietà meccaniche in tutte le direzioni dello spazio; viceversa nelle fibre di grafite ad esempio, la sollecitazione deve essere lungo l'asse principale in modo che possa essere sollecitato il legame covalente. In applicazioni come i dischi dei freni a disco, dove sono richieste buone resistenze all'usura, tipicamente si usano particelle di SiC.



Figura 1.15 Freno a disco AlSiMg-30% SiC in particelle

Il modo di produrre gli MMCs ha un ruolo di importanza vitale nel comportamento meccanico e tribologico: i ricercatori hanno studiato che i campioni prodotti con la tecnica *stir casting* hanno prestazioni superiori rispetto a quelli prodotti con la tecnica della metallurgia delle polveri, dove le particelle e la matrice sono allo stato solido in polveri opportunamente miscelate, pressate e sinterizzate. Entrambe le tecniche sono *ex-situ* (in contrapposizione alle tecniche *in-situ*) dove le particelle di rinforzo della fase dispersa sono prodotte a parte e successivamente aggiunte alla matrice.

Lo *stir-casting* consiste nell'aggiungere particelle di rinforzo in un bagno di metallo fuso e disperderle uniformemente tramite agitazione. È un processo molto semplice ed economico dove l'unica criticità consiste nell'evitare l'agglomerazione delle particelle introdotte nel metallo fuso e creare un buon legame interfacciale con la matrice. Per evitare l'agglomerazione spesso si fa ricorso a tecniche che utilizzano onde di pressione come la cavitazione ultrasonica (28,30).

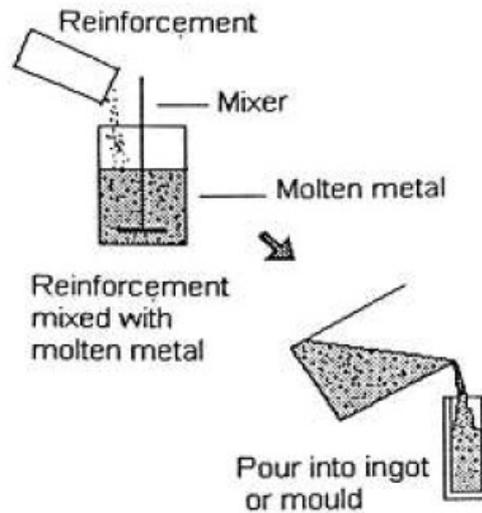


Figura 1.16 Schema processo stir casting

1.2.2 Proprietà tribologiche SiC-Al

Le proprietà tribologiche dei MMCs sono state largamente studiate da diversi studiosi e in generale si può dire che siano migliori rispetto a quelle delle singole matrici non rinforzate.

Possiamo distinguere in tre categorie i molteplici fattori che impattano sulla resistenza all'usura degli AMC:

- Fattori legati alle caratteristiche interne del materiale, come tipologia, dimensione, forma e quantità di rinforzo, e tipologia e microstruttura della matrice;
- Fattori legati ai parametri di prova di un tribo-test e quindi alle condizioni al contorno di uso del materiale, come carico normale, distanza di scorrimento e velocità di scorrimento;
- Fattori ambientali, come temperatura e umidità.

Segue l'analisi di alcune evidenze prodotte dalla letteratura scientifica sulle proprietà tribologiche degli AMC con SiC, trascurando i coefficienti d'attrito (21,24).

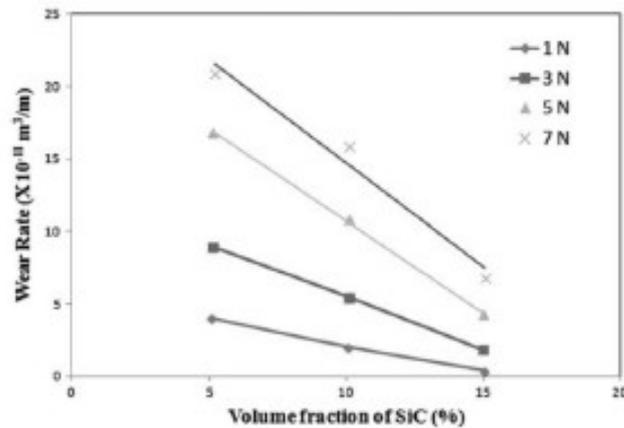


Figura 1.17 Effetto della frazione volumetrica di SiC sul tasso d'usura di un composito a base Al

Come mostra la figura 1.17, l'incremento della frazione volumetrica del rinforzo ha un importante effetto migliorativo sulla resistenza all'usura, espressa in questo caso come tasso di usura. La presenza di un rinforzante duro aumenta le proprietà superficiali di durezza dell'intero materiale, poiché limita la deformazione plastica che può subire la matrice e impedisce i meccanismi di adesione e abrasione. Dall'andamento della curva si vede l'effetto rinforzante dell'aggiunta di particelle di SiC in una matrice di alluminio a differenti carichi di compressione. L'interpolazione lineare delle curve, mostra come l'impatto dell'effetto rinforzante in termini di riduzione di volume asportato sia superiore per carichi elevati.

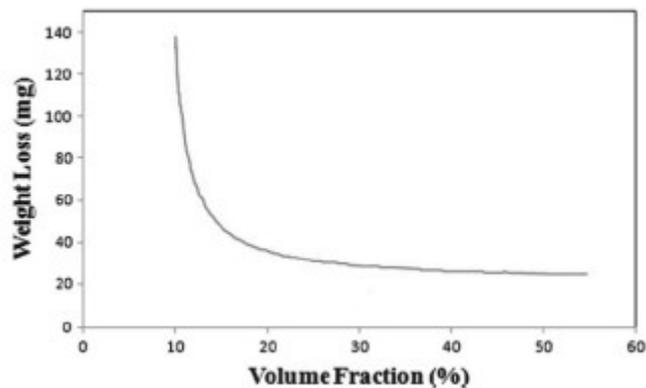


Figura 1.18 Usura in termini di peso del materiale perso di un composito a base Al in funzione della frazione di rinforzo SiC

È interessante evidenziare che oltre una certa percentuale in volume di rinforzo (circa 20%), il tasso di miglioramento delle proprietà di resistenza all'usura subisce una diminuzione, perciò l'apporto di particelle ha rendimenti marginali decrescenti. Un aumento oltre il 70% in frazione di volume è consigliato solo per i materiali di utensili da taglio come le mole di processi tecnologici di rettifica o lappatura (come nel seguente caso studio), dove sono necessari materiali ad elevata durezza rispetto al pezzo da lavorare, tenacizzati leggermente dalla presenza del legante duttile a basse percentuali in volume.

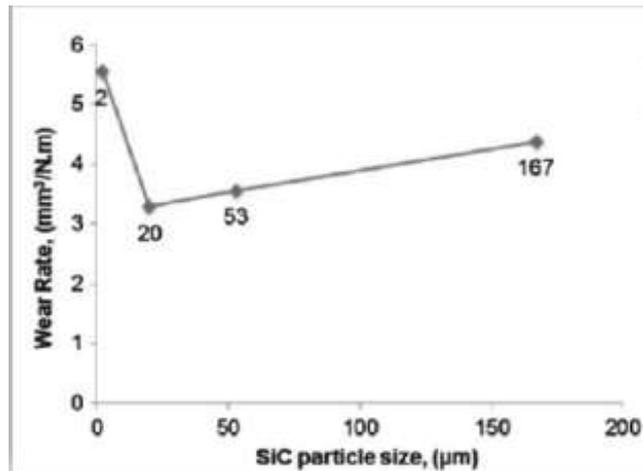


Figura 1.19 Effetto della dimensione delle particelle sul tasso di usura di un composito a base di Al

Gli studi hanno mostrato che anche la dimensione delle particelle ha un'influenza notevole sulle proprietà tribologiche. Aumentando la dimensione delle particelle, dell'ordine dei micrometri, inizialmente il tasso di usura diminuisce fino ad una dimensione critica che dipende dal sistema analizzato; raggiunta la dimensione critica, l'aumento della dimensione non ha più un effetto benefico sulle proprietà meccaniche superficiali. Nel caso della figura 1.19, perciò, bisogna limitare la dimensione caratteristica del SiC sotto i 20 micron circa.

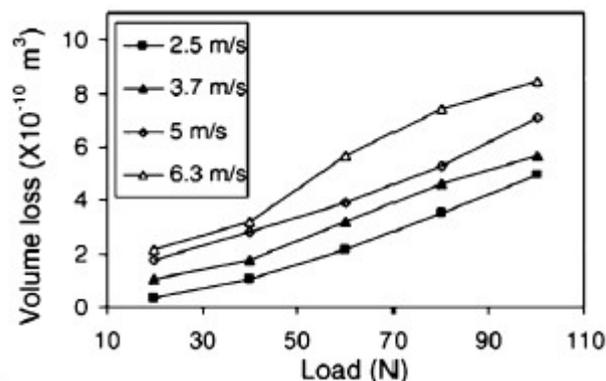


Figura 1.20 Usura in termini di volume del materiale perso di un MMC in funzione del carico normale e della velocità di scorrimento

La figura 1.20 sintetizza l'effetto delle condizioni al contorno, o parametri di prova, in termini di volume asportato sul MMC: l'aumento del carico di compressione chiaramente aumenta l'usura, ma si può notare la presenza di un carico specifico che porta al cambiamento della pendenza delle curve, rendendo dunque più severa l'usura. Allo stesso modo del carico normale, anche aumentando la velocità di scorrimento si ottiene una riduzione della resistenza all'usura. La Figura 1.21 mostra che le prestazioni degli MMCs rispetto ai monolitici, diventano importanti soprattutto a carichi elevati, mentre con carichi bassi di compressione si possono usare nelle applicazioni tranquillamente i materiali monolitici senza dover aumentare i costi.

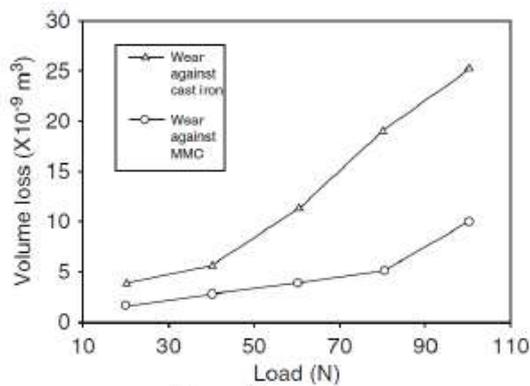


Figura 1.21 Confronto del tasso di usura tra MMC e metallo in funzione del carico normale

Il grafico 1.22 mostra, invece, l'effetto della temperatura sul deterioramento delle proprietà di resistenza ad usura per matrici di Alluminio. Considerando la temperatura di fusione del materiale puro pari a 660°C, il tasso di usura per un materiale non rinforzato cresce già a partire da 150°C. Il grafico mostra come l'aggiunta di grafite o/e di ossidi come l'allumina (ma l'effetto sarà simile per i carburi) aumento le prestazioni termomeccaniche anche fino oltre i 200°C.

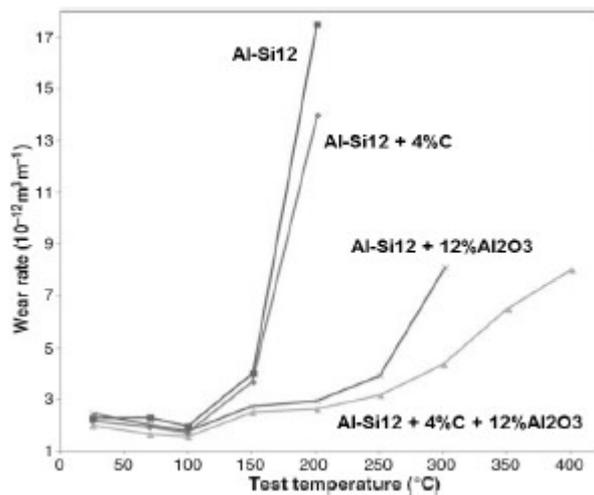


Figura 1.22 Tasso di usura in funzione della temperatura di alcuni MMCs a base di Al e della sola matrice

2 Algoritmi di *Computer vision* per l'analisi dell'usura

L'analisi topografica in 3D è uno dei metodi con cui può essere valutata l'usura. Questa fornisce la topografia del materiale usurato, pertanto l'identificazione spaziale dell'usura permette di confrontare i cambiamenti della superficie topografica prima e dopo il test tribologico, consentendo il calcolo del volume di usura oppure la perdita di massa come differenza delle due misure. Ma per un'analisi topografica 3D, indipendentemente dal metodo usato (automatico o basato sui parametri per il volume come discusso più avanti), il confronto può essere fatto solo dopo una registrazione 3D (46). Gli algoritmi di *Computer vision* hanno lo scopo di trovare la trasformazione che allinei l'area comune della superficie prima e dopo il processo di usura. Usando un interferometro ottico, vengono catturate due *point clouds* della superficie ruvida e per la trasformazione rigida sono stati applicati nel lavoro sperimentale due algoritmi. Il primo è un ICP (**Iterative Closest Point**) usato per fare una registrazione diretta della nuvola di punti 3D. Il secondo algoritmo invece, al fine di ridurre gli errori di allineamento RMSE e quindi dell'incertezza di misura, ha due step principali. Nel primo step *point clouds* 3D ottenute sono state mappate in immagini 2D in scala di grigi applicando l'algoritmo SURF (**Speeded-Up Robust Features**) su entrambe le immagini col fine di individuare i *keypoints* (punti di interesse). In seguito, avendo effettuato un primo matching in 2D, in un secondo step è stato implementato l'ICP per la registrazione in 3D. Il passaggio intermedio attraverso l'immagine 2D serve per fornire una migliore visualizzazione dell'usura, in quanto presenta più dettagli che consentono l'identificazione di features distintive locali, le quali fungono da corrispondenze per la registrazione, riducendo le iterazioni dell'ICP (46).

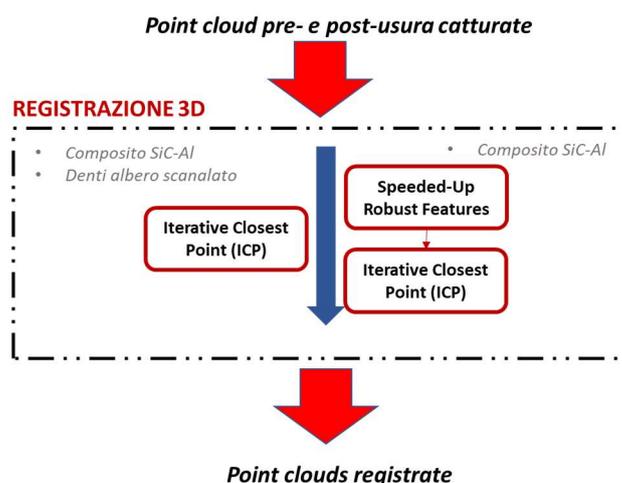


Figura 2.1 Algoritmi di registrazione applicati nello studio. Per i denti dell'albero scanalato la registrazione è avvenuta mediante ICP. Per il provino di SiC-Al la registrazione è avvenuta in un caso con ICP e nell'altro con SURF+ICP.

Occorre sottolineare che la letteratura scientifica propone anche l'uso di tecniche di *Image processing* alternative a quelle seguite nel presente lavoro sperimentale, con metodi basati non solo sulla *detection* dei punti di interesse ma anche altre caratteristiche dell'immagine come la *edge detection* in aggiunta o in sostituzione (*Sobel edge detector*, *Canny edge detector*) oppure la *line detection* (trasformata di *Hough*). Oppure al posto del SURF viene utilizzato il SIFT (**Scale-Invariant feature transform**, Lowe 1999) per l'estrazione (*Difference of Gaussian DOG*) e la descrizione dei *keypoints* e del loro vicinato (vettore di 128 elementi come descrittore) (46-48).

L'algoritmo SURF (2006 da Herbert Bay, Tinne Tuytelaars e Luc Van Gool) nasce infatti con l'obiettivo di migliorare performance e robustezza dell'algoritmo SIFT ed essere più veloce computazionalmente. Grazie a una serie di approssimazioni e accorgimenti sui filtri usati, sulla

modalità di costruzione della piramide spazio-scala e sulla struttura del *descriptor* utilizzato, lo scopo viene raggiunto, mantenendo l'invarianza alla scala e alla rotazione.

Nei paragrafi seguenti verrà evidenziato il funzionamento teorico qualitativo dei due algoritmi usati nel lavoro sperimentale, per la *features detection* nelle immagini e la registrazione di *point clouds 3D*. Lo studio di tali argomenti si concentrerà esclusivamente su ciò che rileva ai fini della ricerca, senza avere la pretesa di una trattazione esaustiva.

2.1 Speeded Up Robust Features (SURF)

L'algoritmo Speeded Up Robust Features (SURF) è un metodo che ha lo scopo di individuare punti di interesse (*keypoints*) in immagini 2D a scala di grigio, mediante un *detector* e un *descriptor*. Tale algoritmo trova applicazione nella registrazione di immagini in cui lo scopo principale è trovare corrispondenze tra due immagini della stessa scena o dello stesso oggetto. Innanzitutto, i 'punti di interesse' vengono selezionati in punti distintivi dell'immagine, come angoli, blobs e incroci a T, per avere una sintesi saliente della stessa (45).

La più importante proprietà di un *detector* di punti di interesse è la sua ripetibilità, cioè è possibile trovare in modo affidabile gli stessi punti di interesse in diverse condizioni di visualizzazione, quindi essere robusto a cambi di illuminazione, rumore e punti di vista, oltre ad essere invariante a rotazioni e cambiamenti di scala, agli errori di rilevamento e alle deformazioni geometriche e fotometriche (45).

A tale scopo il vicinato di ogni punto di interesse è rappresentato da un vettore di caratteristiche. Questo *descriptor* deve identificare il punto dell'oggetto univocamente. L'obiettivo del SURF è quello di sviluppare sia un *detector* che un *descriptor*. Il *detector* del SURF è basato sulla matrice Hessiana, ma al fine di rendere l'implementazione più semplice viene utilizzata un'approssimazione di questa. Tale *detector* si basa sulle immagini integrali al fine di ridurre il tempo computazionale. Il *descriptor* invece si basa su una distribuzione delle risposte alle *wavelet Haar* all'interno del vicinato del punto di interesse. Un'immagine integrale in una posizione $\mathbf{x} = (x, y)$ (riga e colonna di un'immagine) rappresenta la somma dei valori dell'intensità dei pixel nell'immagine di input I di una regione rettangolare compresa tra l'origine e il punto \mathbf{x} tale per cui (45):

$$I_{\Sigma}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j) \quad (2.1)$$

2.1.1 Fast-Hessian Detector

Si utilizza un detector basato sulla matrice Hessiana in quanto fornisce buone performance per quanto riguarda sia l'accuratezza che il tempo computazionale. Dato un punto $x = (x, y)$ in un'immagine I , la matrice Hessiana $H(x, \sigma)$ viene definita come segue:

$$H(x, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

dove $L_{xx}(x, \sigma)$ è la convoluzione dell'immagine I in un punto x con la derivata seconda di una gaussiana $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$. Lo stesso concetto vale per L_{xy} e L_{yy} (45). La convoluzione consente il filtraggio dell'immagine. La formula della convoluzione è riportata di seguito:

$$g(i, j) = \sum_{u=-\frac{t-1}{2}}^{\frac{t-1}{2}} \sum_{v=-\frac{t-1}{2}}^{\frac{t-1}{2}} h(u, v) f(i - u, j - v) \quad (2.3)$$

Dove f è l'immagine in ingresso, g è l'immagine in uscita e h è il kernel che permette il filtraggio dell'immagine. Il kernel è una matrice di dimensioni ridotte rispetto all'immagine di partenza. In particolare, il kernel viene centrato un punto (u, v) dell'immagine in modo tale che i valori del kernel vengano moltiplicati per i punti corrispondenti dell'immagine f come viene mostrato in figura.

L'immagine di output ha le stesse dimensioni dell'immagine in input. In base al kernel k è possibile implementare un filtro passa-basso, che ha il compito di eliminare il rumore presente nell'immagine, oppure un filtro passa-alto che ha il compito di evidenziare le discontinuità dell'immagine.

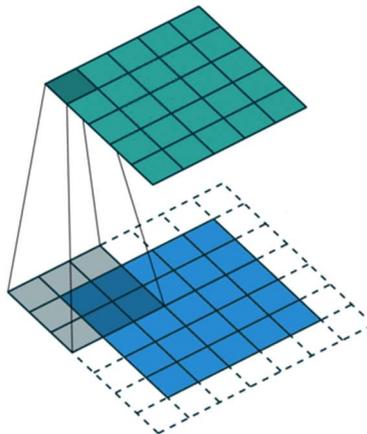


Figura 2.1 Esempio di filtraggio di un'immagine per convoluzione, mediante un kernel

In particolare, nell'algoritmo SURF l'immagine viene filtrata passa-alto in quanto viene implementata la derivata seconda del filtro gaussiano chiamato laplaciano del filtro gaussiano. La formula del kernel del filtro gaussiano è mostrata di seguito:

$$h(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{\sigma^2}} \quad (2.4)$$

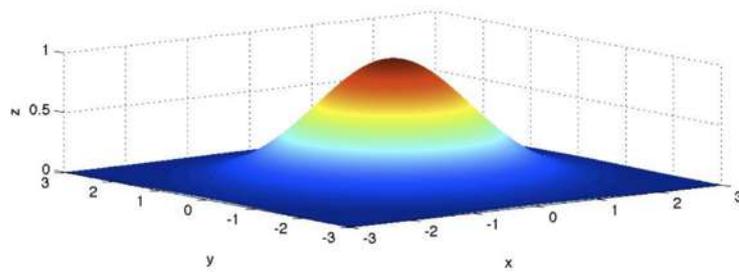


Figura 2.3 rappresentazione grafica della funzione del filtro gaussiano

Implementando soltanto un filtro gaussiano (filtro passa-basso) è possibile rimuovere il rumore all'interno dell'immagine.

Al kernel del filtro gaussiano viene applicata la derivata seconda (laplaciano) e quindi si ottiene la funzione di filtro passa-alto in quanto le derivate hanno la funzione di identificare le discontinuità dell'immagine (come i bordi dell'immagine).

Di seguito viene riportata la formula della derivata seconda del filtro gaussiano:

$$g(x, y) = L(x, y) \circ [G(x, y) \circ f(x, y)] = [L(x, y) \circ G(x, y)] \circ f(x, y) \quad (2.5)$$

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[1 - \frac{x^2+y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.6)$$

Dalla formula riportata si nota che viene applicato in primis un filtro gaussiano (per rimuovere il rumore) e in seguito il laplaciano (per evidenziare le discontinuità dell'immagine).

La forma del kernel rappresentante il laplaciano del filtro gaussiano è riportata di seguito:

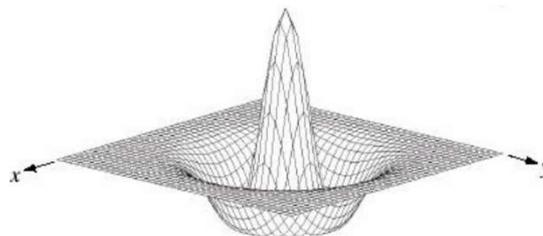


Figura 2.4 esempio grafico di laplaciano del filtro gaussiano (cappello messicano)

Quindi la matrice Hessiana riporta l'informazione relativa al laplaciano del filtro gaussiano in direzione, x , y e xy . Nell'algoritmo SURF, si implementa il laplaciano del filtro gaussiano utilizzando un'approssimazione di esso tale da rendere l'algoritmo molto veloce.

In particolare, il laplaciano del filtro gaussiano viene approssimato mediante delle 'box' di intensità costante. Di seguito si riportano le approssimazioni del filtro in direzione y e in direzione xy (45).

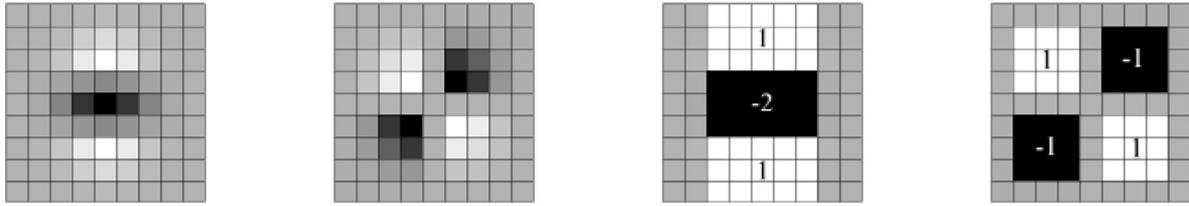


Figura 2.5 Approssimazione del laplaciano del filtro gaussiano (direzione y e xy) mediante zone di intensità costante.

In particolare, da sinistra a destra viene mostrato il laplaciano del filtro gaussiano in direzione y (tale da evidenziare le discontinuità sull'asse y) e il laplaciano del filtro gaussiano in direzione xy. La terza e la quarta immagine rappresentano l'approssimazione del filtro attraverso delle box di intensità costante in direzione y e xy, rispettivamente.

Riassumendo, la velocità dell'algoritmo è data da:

- L'utilizzo dell'integrale dell'immagine;
- L'utilizzo delle approssimazioni del laplaciano del filtro gaussiano in direzioni x, y e xy.

In seguito all'approssimazione del laplaciano del filtro gaussiano è possibile ottenere una matrice Hessiana approssimata della quale poi verrà calcolato il determinante con la formula riportata di seguito:

$$\det(H_{approx}) = D_{xx}D_{yy} - (0,9D_{xy})^2 \quad (2.7)$$

Gli step riportati in precedenza (approssimazione della matrice Hessiana e calcolo del determinante) vengono ripetuti per sigma diversi e per kernel di dimensione differente in modo da costituire delle piramidi di immagini (spazio-scala) (il confronto di immagini spesso si fa a scale diverse ed è necessario che i punti di interesse siano sempre individuati). A differenza del SIFT, le approssimazioni di calcolo permettono di ottenere i vari *layer* della piramide filtrando l'immagine originale con kernel via via più grandi, invece del ridimensionamento dell'immagine (45,47).

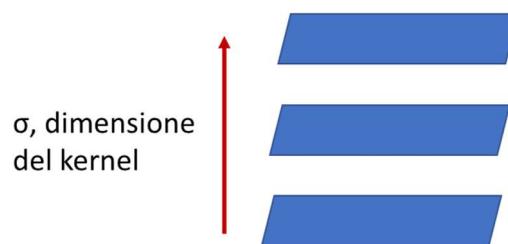


Figura 2.6 costruzione dello spazio-scala filtrando l'immagine per sigma diversi e per kernel di dimensione differente

Si filtra, quindi, l'immagine con kernel di dimensioni diverse e con sigma diverse in modo tale da considerare scale d'immagine differente e rendere l'algoritmo robusto a scale diverse. A questo punto, per trovare un punto di interesse, viene definito un vicinato 3*3*3, come mostrato in figura. (3 *layers* e 26 punti).

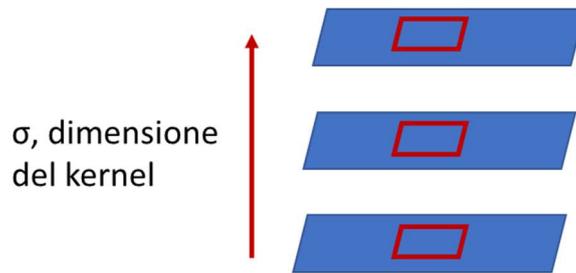


Figura 2.7 Identificazione del key-point in un vicinato dello spazio-scala

Al fine di localizzare i punti di interesse all'interno dell'immagine e in scale diverse, viene effettuata la *soppressione dei non-massimi* all'interno del vicinato $3 \times 3 \times 3$ per poi calcolare il massimo del determinante della matrice Hessiana che rappresenterà il **punto di interesse**, ovvero la discontinuità più forte. (intensità immagine maggiore), definendone la *location* a una certa scala (45).

2.1.2 SURF Descriptor

Per la creazione del descrittore bisogna definire un orientamento principale analizzando un'area circolare nell'intorno del punto di interesse e in seguito viene costruita una griglia quadrata allineata con l'orientamento e si estrae da questa il descrittore SURF.

Orientamento: Per ogni punto di interesse viene individuato un orientamento principale col fine di raggiungere l'invarianza rispetto alla rotazione. Per fare ciò, si definisce un intorno circolare col raggio pari a $6s$, dove s rappresenta la scala in cui il punto è identificato. Si calcolano le risposte alla *wavelet di Haar* (di lunghezza $4s$) nelle direzioni x , y dei punti appartenenti all'intorno e le risposte vengono rappresentate come un vettore nello spazio di ascissa x e ordinate y . L'orientamento dominante è stimato calcolando la somma di tutte le risposte in una finestra scorrevole di apertura 60° che definisce un nuovo vettore (45).

Componenti del descrittore: al fine di estrarre il descriptor SURF, si definisce una regione quadrata centrata intorno al punto di interesse precedentemente selezionato e orientata lungo l'orientamento principale.

Tale regione viene divisa in ulteriori sub-regioni quadrate 4×4 . Per ognuna di queste sub-regioni viene applicata la *wavelet Haar* in direzione orizzontale dx e verticale dy . (45)



Figura 2.8 rappresentazione della wavelet Haar lungo x (in alto) e lungo y (in basso)

Dall'alto in basso viene rappresentata la wavelet Haar lungo l'asse x e la wavelet lungo l'asse y. Nell'ambito dell'immagine processing, l'applicazione di questa wavelet consiste nell'evidenziare le discontinuità lungo l'asse x (dx) quindi le discontinuità orizzontali e sull'asse y (dy) quindi le discontinuità verticali in modo da descrivere al meglio il vicinato del punto di interesse.

Le risposte alle wavelet dx e dy vengono sommate all'interno di ogni regione ed inoltre ne viene calcolato il valore assoluto in modo da tenere conto anche della polarità dei cambiamenti di intensità all'interno dell'immagine.

Quindi per ogni sub-regione, verrà creato un descriptor che è un vettore v contenente 4 valori, che sono le risposte alle wavelet (45):

$$V = (\sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y|) \quad (2.8)$$

Di seguito, si riporta una figura che riporta come il vettore v descrive il comportamento delle sottoregioni.

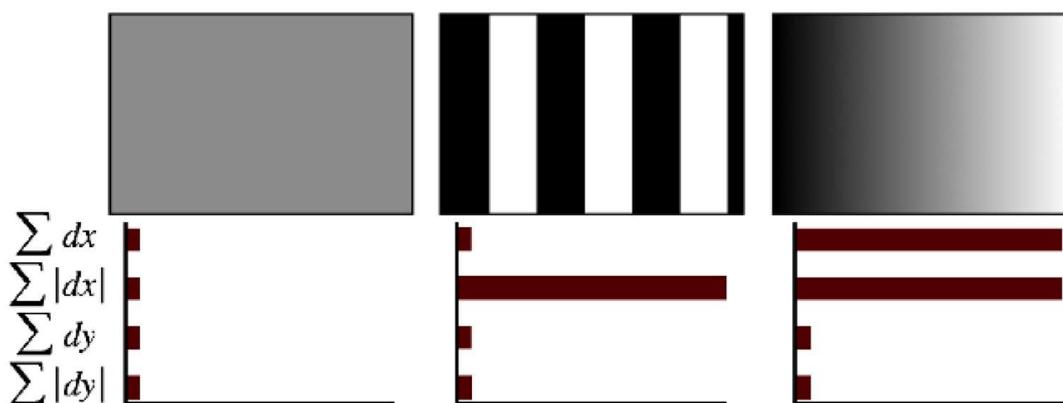


Figura 2.9 componenti del descriptor in base alle risposte alle wavelet, nel caso di 3 regioni diverse

Da sinistra a destra:

- la prima sub-regione è una regione grigia omogenea in cui non ci sono discontinuità lungo l'asse x e y. Quindi, non essendoci discontinuità, tutti i valori del vettore v sono circa nulli;
- la seconda sub-regione presenta delle discontinuità lungo l'asse x, ma non ci sono discontinuità lungo l'asse y quindi i valori riferiti alla wavelet lungo l'asse y sono circa nulli. Essendoci delle discontinuità lungo l'asse x, si nota che somma di dx è circa nulla in quanto si passa dal bianco e nero e dal nero al bianco e di conseguenza le risposte alla wavelet risultano essere uguali ed opposte in segno. Per lo stesso motivo il valore assoluto di dx è molto alto;
- la terza sub-regione presenta delle discontinuità che variano gradualmente lungo l'asse x, ma non ci sono discontinuità lungo l'asse y quindi i valori riferiti alla wavelet lungo l'asse y sono circa nulli. In questo caso, sia la somma di dx che il suo valore assoluto presentano valori molto alti in quanto si passa dal nero al bianco in maniera molto graduale.

Riassumendo, l'output dell'algoritmo SURF fornisce la posizione dei punti di interesse, tramite il detector, e un descrittore che contiene informazioni riguardo al vicinato del punto di interesse. Grazie a questi due output è possibile effettuare registrazione di immagini.

2.2 Iterative Closest Point (ICP)

Dopo una procedura iniziale di identificazione dei *keypoints* nelle immagini 2D, le coordinate 3D dei punti identificati sono recuperate per implementare l'algoritmo di registrazione nel caso SURF+ICP. Questo, nella fase di *data association* dell'algoritmo ICP, permette di trovare le corrispondenze in modo non solo più veloce e con tempo computazionale inferiore, ma riduce anche gli errori di registrazione rispetto all'implementazione dell'ICP semplice.

L'algoritmo di *Iterative Closest Point* (ICP) (P. Besl, 1992) è un metodo indipendente e iterativo per la registrazione di point clouds 3D o 2D ed esegue iterativamente due fasi principali: la determinazione dei punti di corrispondenza tra i due dataset (*data association*) e la registrazione vera e propria (44). La letteratura propone diverse varianti soprattutto della prima fase, che consistono soprattutto nel sottocampionamento o meno delle point clouds, nell'eliminazione degli outliers o nella definizione diversa delle corrispondenze, con lo scopo di risolvere alcuni limiti dei diversi approcci (velocità, minimi locali) (46). Qui segue in modo sintetico la versione più tradizionale.

L'algoritmo ICP converge sempre monotonicamente al minimo locale (che nel caso ideale converge col globale) più vicino basandosi sulla metrica della distanza quadratica media.

L'obiettivo dell'ICP è trovare la trasformazione che allinea un generico dataset (P) ad un modello (X). La trasformazione in questione è una matrice di rotazione e un vettore traslazione che verranno poi combinate per formare una matrice rototraslazione. In particolare, il dataset *P* viene spostato (registrato, posizionato) in modo da essere allineato con il modello *X* mediante l'identificazione dei punti più vicini (*closest points*) del dataset *P* rispetto al modello *X*. Sia il dataset *P* che il modello *X* devono essere decomposti in un dataset di punti. In particolare, sia N_p il numero di punti appartenenti al dataset *P* e sia N_x il numero di punti del modello *X* (44).

L'ICP si articola nei seguenti step:

- Individuazione dei *closest points*: la metrica sulla distanza d tra un punto del dataset p a un punto del modello x è:

$$d(\vec{p}, X) = \min_{\vec{x} \in X} |\vec{x} - \vec{p}| \quad (2.9)$$

I *closest points* sono i punti appartenenti al modello *X* che hanno la minima distanza rispetto al dataset *P*. L'operazione di individuazione dei *closest points* viene scritta nel seguente modo (44):

$$Y = C(P, X) \quad (2.10)$$

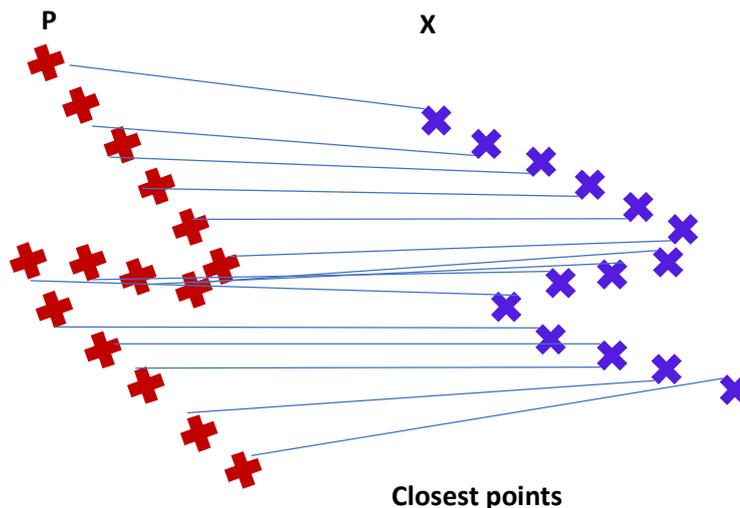


Figura 2.10 fase di Data association point to point dell' algoritmo ICP

- Registrazione tra i *closest points* Y e il dataset P : si inizializza la matrice di rotazione e il vettore traslazione permette l'allineamento tra i punti P e Y (44).
- Calcolo della registrazione (definizione della matrice di rotazione e del vettore traslazione): per identificare la matrice di rototraslazione che permette il migliore allineamento tra il dataset P e i *closest points* Y , viene minimizzata la seguente funzione obiettivo (distanza quadratica media):

$$f(\vec{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\vec{y}_{ik} - R(\vec{q}_{kR})\vec{p}_{i0} - \vec{q}_{kT}\|^2 \quad (2.11)$$

Dove \mathbf{R} è la matrice di rotazione e \mathbf{q} è il vettore traslazione. In particolare, si applicano ai punti appartenenti al dataset P una serie di matrici di rotazione e di traslazione e si calcola la distanza tra i *closest point* Y e i punti del dataset P in seguito alle registrazioni effettuate. Di queste distanze si selezionano la matrice di rotazione e il vettore traslazione in corrispondenza del minimo della funzione obiettivo. L'operazione di calcolo della registrazione viene scritta nel seguente modo:

$$(\vec{q}_k, d_k) = Q(P_0, Y_k) \quad (2.12)$$

Dove \mathbf{Q} è la matrice di rototraslazione che permette il migliore allineamento tra i punti del dataset P e i *closest point* Y , d_k è il valore della funzione obiettivo (distanza media) corrispondente al migliore allineamento (44).

Una rotazione generale in 3 dimensioni può essere espressa come una composizione di 3 rotazioni intorno a tre assi indipendenti, come ad esempio gli assi x , y , z . Quindi dati tre angoli α , β , γ , che indicano rispettivamente di quanto si deve ruotare intorno a ognuno degli assi, la matrice di rotazione risulta:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Questa matrice è combinata con il seguente vettore di traslazione in un'unica matrice 4*4:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

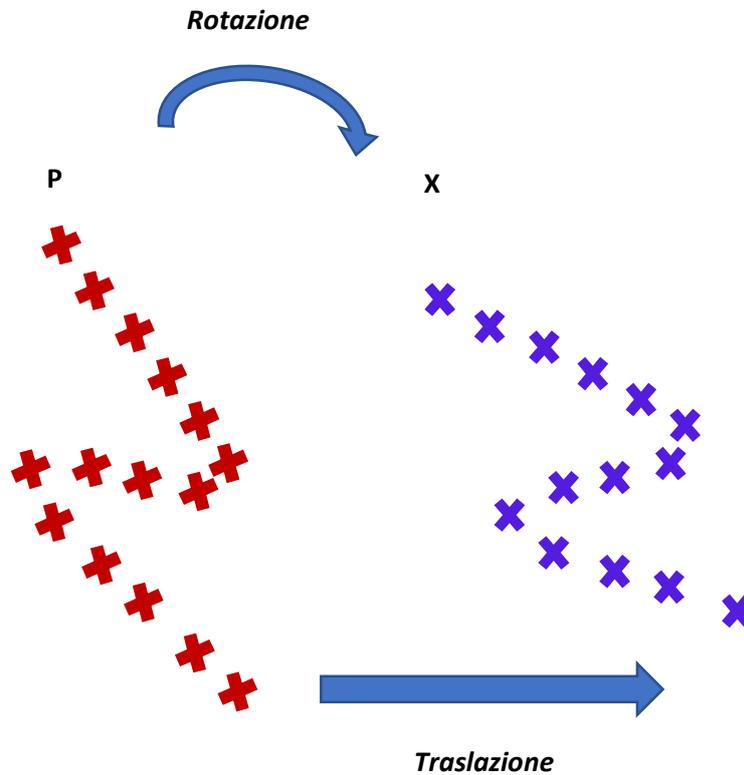


Figura 2.11 Fase di registrazione dell'algoritmo ICP

L'ICP è un algoritmo iterativo quindi gli step spiegati precedentemente (compresa la ridefinizione dei *closest points*) vengono implementati finché non si arriva alla seguente condizione di stop (convergenza) (44):

$$d_k - d_{k+1} < \tau \quad (2.13)$$

Se la differenza tra la funzione obiettivo nell'iterazione corrente e precedente è minore di una soglia allora la matrice di rototraslazione corrente è quella che permette il miglior allineamento. Se invece la differenza è maggiore della soglia allora l'algoritmo viene re-iterato finché non si giunge a convergenza. Un'altra condizione di stop dell'algoritmo può essere definita limitando il numero delle iterazioni.

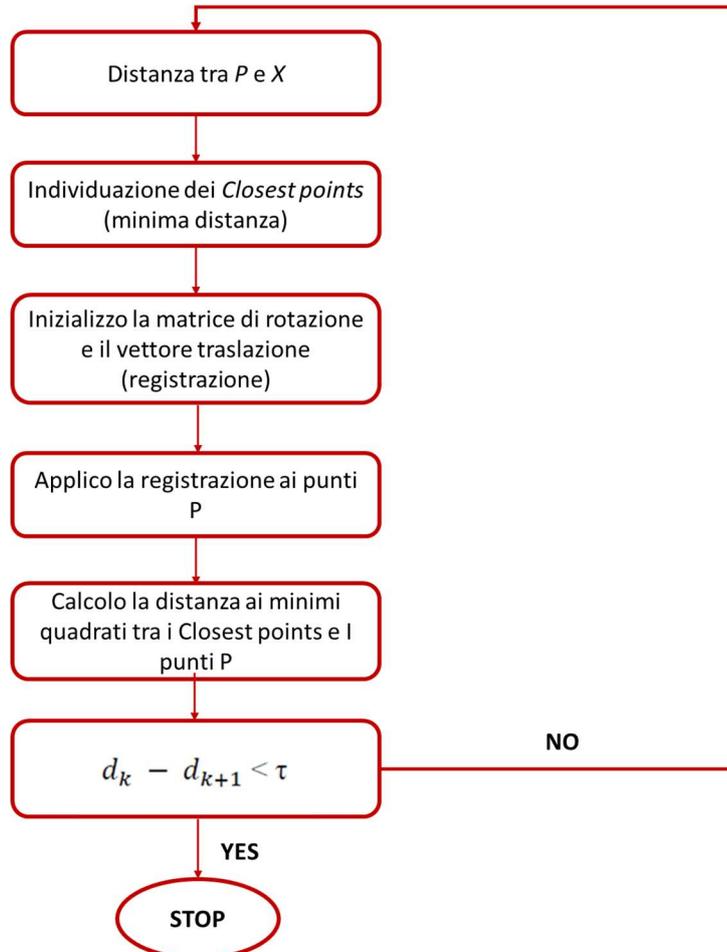


Figura 2.12 Fasi dell'algorithm Iterative Closest point

3 Metodi topografici per la caratterizzazione dell'usura

Per caratterizzare correttamente il danno d'usura è necessario definire rigorosamente il **misurando**, attraverso una definizione più specifica di usura rispetto a quelle generali tribologiche fornite nel primo capitolo. La definizione del misurando è prioritaria in qualsiasi procedura di misurazione in quanto impatta fortemente sulla scelta dei metodi e strumenti di misurazione. Inoltre, garantisce e incoraggia uniformità e accuratezza nell'analisi dei risultati dei test di usura.

A questo scopo si possono utilizzare le definizioni fornite dalla norma standardizzata ASTM G40-17, 'Standard Terminology Relating to Wear and Erosion' (49), relativa alle misurazioni d'usura ed esaminarle nel caso di un tipico profilo estratto da un tribo-test Pin-on-Disc.

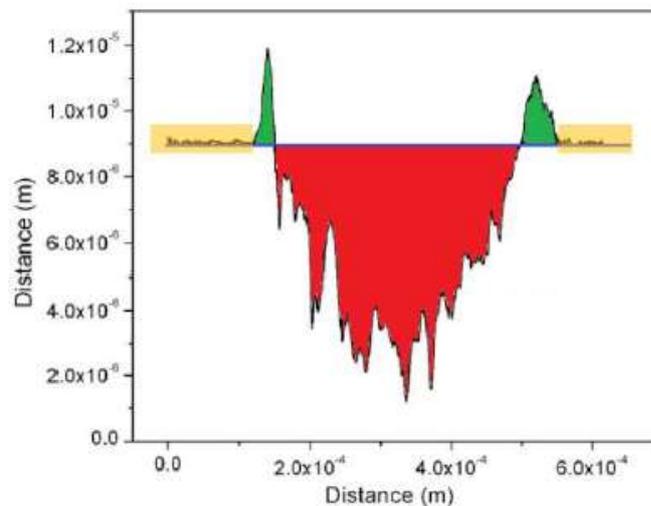


Figura 3.1 sezione trasversale di una traccia d'usura in un test pin-on-disc.

La Figura 3.1 mostra la sezione trasversale di una traccia di usura in un campione generata dal test di modello. Fittato un profilo nella zona indeformata esterna alla traccia di usura (zona gialla), si possono distinguere due parti rispetto alla linea di riferimento blu: una zona rossa inferiore che rappresenta il materiale asportato durante il test e due zone verdi adiacenti al di sopra che rappresentano il materiale riportato in superficie per fenomeni di trasferimento o spostamento del materiale, come il deposito di detriti di usura oppure il flusso plastico dovuto alla pressione del perno.

A tal proposito la norma fornisce tre definizioni riconducibili a questi volumi (in 3D):

- *Wear*: 'alterazione della superficie di un solido per la perdita progressiva o lo spostamento progressivo di materiale dovuto al movimento relativo tra quella superficie e una sostanza a contatto (o sostanze)' (49); pertanto, questo danno si può assimilare al volume rosso.
- *Galling*: 'forma di danno superficiale che si verifica tra solidi che strisciano, distinguibile microscopicamente da un irrugosimento superficiale localizzato e dalla creazione di sporgenze al di sopra della superficie originale' (49); Questo fenomeno si verifica a seguito di una forte usura adesiva tra i materiali, che porta alla rottura delle microsaldature tra i corpi striscianti a causa delle azioni di taglio, generando trasferimento di materiale oppure è causato dal flusso plastico del materiale conseguente alle generazione di pressioni di compressione elevate; nella figura si può ricondurre al volume verde;

- *Damage*: ‘qualsiasi effetto sul corpo del solido che è il risultato della sua esposizione a questi fenomeni. Questi effetti includono perdita di materiale, deformazione superficiale, o qualsiasi altri cambiamenti nella microstruttura, proprietà o aspetto’ (49).

Dunque, il danno totale superficiale, quantificato con il volume, secondo la norma ASTM G40 è riconducibile alla somma di due contributi (49):

$$V_{damage} = V_{wear} + V_{galling} \quad (3.1)$$

Questa definizione di danno totale, perciò, non è limitata alla sola perdita di materiale ma, superando le definizioni di usura tipiche della scienza dei materiali e in accordo con una prospettiva ingegneristica in termini di progettazione e qualità, include qualsiasi cambiamento della topografia causato dalle interazioni meccaniche, che potrebbe alterare la resistenza strutturale o la funzionalità dei componenti (50). Pertanto, nel caso in cui la tolleranza e la forma dei profili sia un parametro importante, questa definizione di danno superficiale è più adeguata.

Come mostrato in Figura 3.2 la letteratura scientifica propone due approcci standard per la misurazione dell’usura: l’approccio gravimetrico e l’approccio volumetrico.

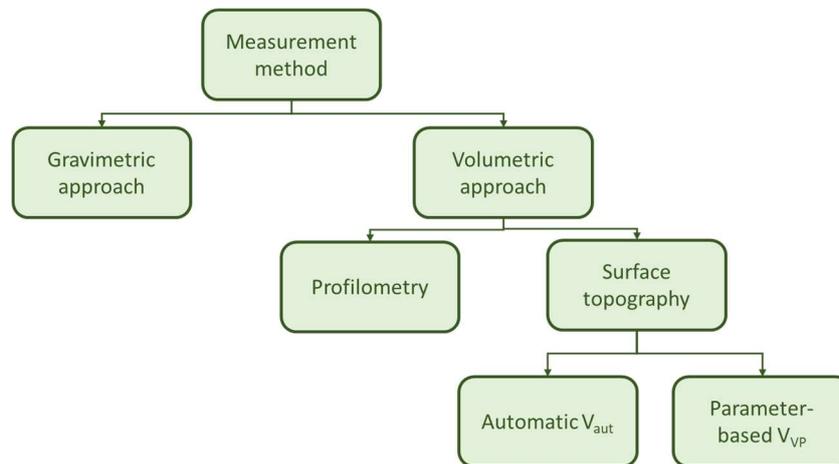


Figura 3.2 metodi per la caratterizzazione dell’usura disponibili in letteratura.

L’approccio gravimetrico, seppur molto semplice, stimando l’usura attraverso la misura della perdita di massa (da cui si può ricavare il volume conoscendo la densità), non consente di determinare, ad esempio, il contributo del *galling* e i risultati dell’asportazione di materiale sono sottostimati e presentano un *bias* legato al fenomeno del trasferimento e spostamento del materiale. Questo metodo di misura è inadeguato per le caratterizzazioni di fenomeni su piccola scala come il *fretting*, mentre risulta accettabile solo nel caso in cui l’usura sia abbastanza importante rispetto alla massa del corpo (50-52).

L’approccio volumetrico, invece, caratterizza l’usura direttamente in termini di volume. Questo metodo consente di considerare, non solo il volume del danno superficiale come misurando ma permette anche, come vedremo, di distinguere i due contributi *wear* e *galling*, valutandoli separatamente, risultando così particolarmente flessibile. A differenza dell’approccio gravimetrico, fornisce indicazioni accurate dell’usura sia in presenza di materiale non omogeneo, sia nei materiali con rivestimenti multistrato che nel caso di materiali che presentano fasi differenti, perché non richiede la conoscenza precisa della densità del materiale.

Per valutare il danno sulla superficie del materiale dopo un test tribologico, ci sono diverse interpretazioni del metodo volumetrico; in particolare ci possono essere misurazioni profilometriche

oppure misure della topografia superficiale. Gli standard hanno incorporato i metodi basati sull'estrazione del profilo ma questi mostrano dei limiti in quanto determinano una significativa perdita di dati, perdendo di rappresentatività. Inoltre, permettono solo una valutazione del volume di usura medio.

Per questo motivo il lavoro di ricerca condotto, prendendo spunto dall'ampia letteratura scientifica presente, sfrutta la topografia per la caratterizzazione del volume di usura. Lo strumento utilizzato appartiene alla classe dei microscopi ottici basati sull'interferenza, ovvero il CSI (*coherence scanning interferometry*) che è una delle tecniche più usate per la misura della topografia superficiale.

Nei paragrafi successivi saranno trattati due approcci: quello Automatico (*Automatic V_{aut}*) e quello basato sui parametri superficiali (*Parameter-based V_{VP}*). Ma, prima dell'analisi dei modelli matematici dei due metodi, seguirà una descrizione del funzionamento degli strumenti utilizzati per le misurazioni della topografia superficiale e in particolare del CSI. Inoltre, verrà fatto un breve cenno sullo studio della *texture* di una superficie topografica mediante la descrizione delle operazioni di *preprocessing* delle superfici topografiche scansionate (*filtering*) e mediante un'illustrazione dei parametri superficiali definiti dalla norma ISO 25178, la cui comprensione è importante per l'analisi degli approcci.

3.1 Strumenti di misura utilizzati per le misurazioni topografiche

Gli strumenti utilizzati per la misurazione della topografia superficiale possono essere divisi in due gruppi: profilometri a contatto e non contatto. A loro volta, come mostrato in Figura 3.3, gli strumenti 3D possono essere classificati in base al metodo di rilevamento utilizzato per scansionare la topografia superficiale: profilometro meccanico, strumenti ottici topografici e microscopi a scansione. Segue una breve descrizione delle caratteristiche dei principali strumenti utilizzati per la metrologia superficiale. Mentre l'interferometro CSI, utilizzato nella ricerca, sarà oggetto di un'analisi più approfondita.

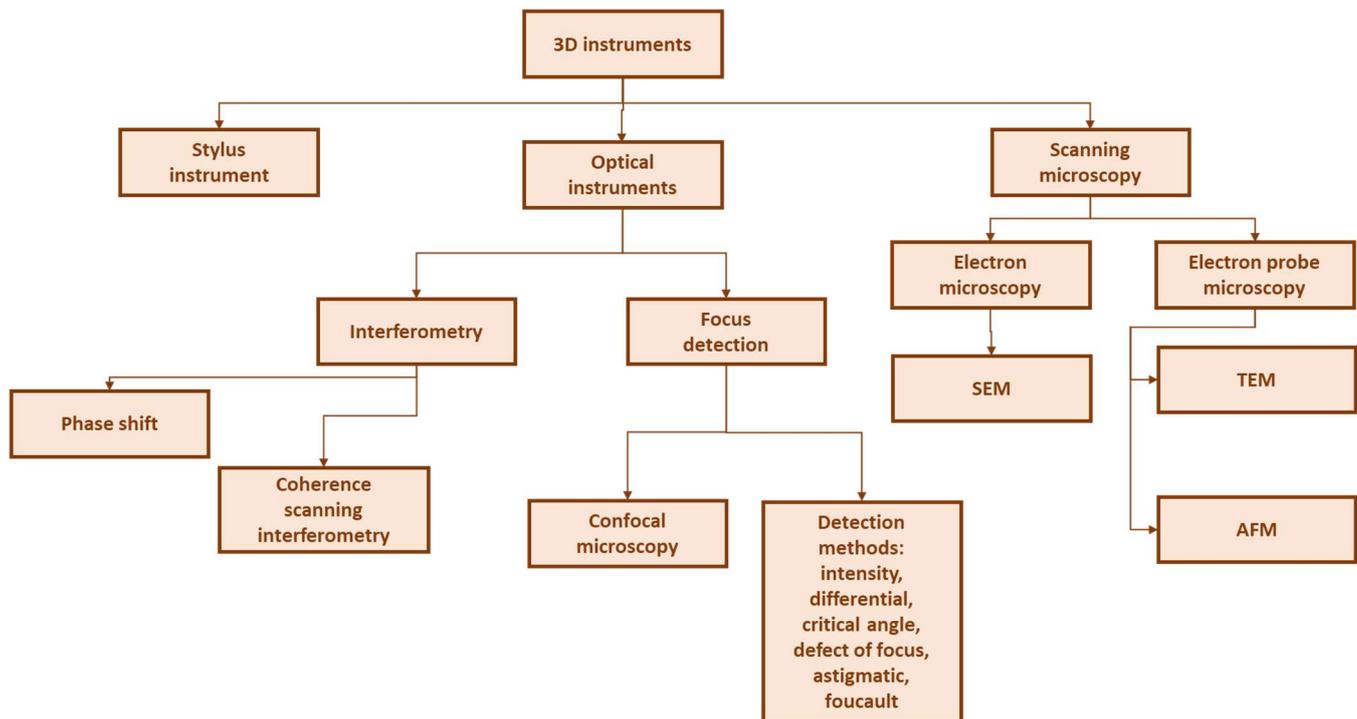


Figura 3.3 Classificazione degli strumenti di misura topografici in base al metodo di rilevamento

3.1.1 Metodi a contatto

I metodi a contatto hanno il vantaggio di essere metodi standardizzati e approvati e, inoltre, sono indipendenti dalla superficie (superando il problema dei campioni sporchi).

Il **profilometro a stilo** (o profilometro meccanico) è la tecnica più comune utilizzata per determinare la superficie attraverso un sistema di misurazione basato su uno stilo. Lo stilo viene mosso sulla superficie per una distanza predefinita. Il movimento verticale relativo dello stilo rispetto al datum è una misura della deviazione della superficie reale rispetto la superficie geometrica. Il movimento viene rilevato da un trasduttore e il segnale registrato viene convertito in un'informazione di altezza. La topografia 3D viene restituita mediante il movimento sul piano x-y. Anche se il tempo di misura cresce enormemente, questo spiega il perché questo strumento viene utilizzato soprattutto per approcci profilometrici e non topografici. La punta dello stilo è solitamente realizzata in materiale duro come il diamante e ha un raggio di curvatura compreso tra 0,5-50 μm . La risoluzione verticale (ordine nm) degli strumenti a stilo è determinata dalla forma della punta dello stilo e dal raggio di curvatura, la risoluzione laterale dello strumento (μm) è definita dall'intervallo di campionamento tra i punti dati. Un altro limite è dovuto al fatto che la forma dello stilo, la velocità di misurazione e il carico applicato possono causare la deformazione della superficie oppure errori di misurazione (53).

Anche i **microscopi a scansione di sonda (SPM)** appartengono a questa famiglia. Una sonda fisica dalle dimensioni inferiori di 10 nm è utilizzata per la misurazione della struttura superficiale. La distanza tra la punta e la superficie misurata in un SPM è di circa 0,1-10 nm. A seconda dei diversi tipi di interazione tra punta e superficie ci sono diversi tipi di microscopio come il microscopio a **effetto tunnel**, che si basa sul fenomeno di una corrente di tunneling tra una punta metallica e una superficie conduttrice; vari tipi di forze di interazione sono le basi per i microscopi a **forza atomica**, forza magnetica e forza elettrica (54).

Il microscopio a forza atomica (AFM) consiste di una microleva (cantilever) alla cui estremità è montata una punta acuminata, che presenta un raggio di curvatura dell'ordine dei nanometri. La punta investigatrice (in Silicio) viene collocata nelle strette vicinanze della superficie del campione di cui si vuole effettuare la scansione. La Forza di van der Waals che agisce tra la punta ed il campione provoca una deflessione della microleva (la cui costante elastica è nota), in accordo con la legge di Hooke. La deflessione della leva viene misurata utilizzando un punto laser riflesso dalla sommità della microleva verso una matrice di fotodiodi (55).

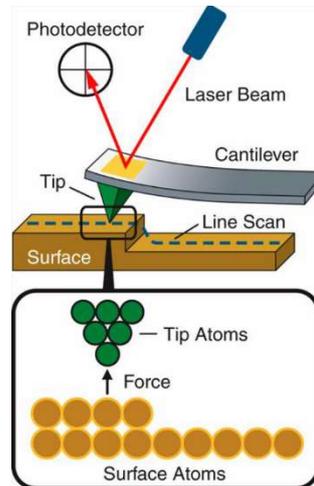


Figura 3.4 Configurazione di un microscopio a forza atomica

3.1.2 Metodi a non contatto

Gli strumenti di misura a non-contatto hanno numerosi vantaggi in quanto sono appositamente costruiti per raggiungere misurazioni topografiche 3D. I vantaggi sono:

- Velocità: Non toccando la superficie, la velocità di scansione dipende solo dalla velocità di riflessione della luce sulla superficie e dalla velocità di acquisizione dell'elettronica dello strumento.
- Affidabilità: i profilometri ottici non toccano le superfici e non possono danneggiarle, sono più sicuri. Molti profilometri senza contatto hanno bisogno di poca manutenzione.
- Risoluzioni migliori.

Tra le tecniche per questi metodi, la più diffusa è la microscopia ottica che consiste nell'illuminare il campione con un'onda elettromagnetica. Ma anche la microscopia elettronica è una delle tecniche senza contatto utilizzate per la misurazione della topografia superficiale e può essere suddivisa in due tipi: microscopia elettronica a scansione (SEM) e Microscopia elettronica a trasmissione (TEM) (65).

Il **microscopio elettronico a scansione** non sfrutta la luce come sorgente di radiazioni. Il fascio viene generato da una sorgente elettronica, tipicamente un filamento in Tungsteno, che emette un flusso di elettroni primari concentrato da una serie di lenti elettromagnetiche e deflesso da una lente obiettivo. Uno dei possibili effetti prodotti dall'interazione fra l'elettrone e la materia è rivelato e trasformato in segnale elettrico che, trattato e amplificato, viene modulato in segnale televisivo. Il limite è legato al fatto che il risultato è un'immagine in bianco e nero e non è disponibile alcun valore quantitativo anche se permette un'elevata risoluzione, grande profondità di campo ed elevati ingrandimenti. Una tecnica di fotogrammetria stereo viene utilizzata per creare topografia 3D da immagini SEM (in particolare sfrutta due immagini superficiali prodotte dal SEM ciascuna inclinata

con un angolo diverso). Il SEM deve operare in vuoto spinto e il campione deve essere conduttivo e messo a terra. Se il campione non è conduttivo deve essere rivestito con materiale conduttivo.

Il **microscopio confocale** è così chiamato in quanto il percorso ottico di illuminazione e di rilevazione condividono il medesimo piano focale. Il metodo di formazione dell'immagine in un microscopio confocale differisce da quello di un microscopio composto convenzionale per il fatto che, mentre nel secondo il fascio di illuminazione investe l'intero campione e forma istantaneamente l'immagine sul rivelatore, nel primo la luce proveniente dalla sorgente illumina l'oggetto un solo punto per volta ed è necessaria una scansione per formare l'immagine finale. (per la scansione 3D oltre il movimento x-y, è richiesta la scansione verticale cosicché ogni punto della superficie passi attraverso il piano focale del microscopio). L'uso di questa tecnica permette di raggiungere risoluzioni assiali molto ridotte. In particolare, due *pinhole* sono posizionati alla stessa distanza dal campione, uno di fronte la sorgente luminosa e l'altro al *detector*. La luce, passando il *pinhole*, raggiunge il *beamsplitter* (che riflette solo la lunghezza d'onda di eccitazione) e tramite l'obiettivo raggiunge il campione. La luce riflessa dalla superficie passa attraverso il *beamsplitter* fino al rivelatore. I *pinhole* di illuminazione e quello di rivelazione appartengono a piani focali coniugati e si dicono dunque confocali. I vantaggi della microscopia confocale sono: basso rapporto segnale-rumore; riduzione della sfocatura dell'immagine dovuta alla dispersione della luce; maggiore risoluzione effettiva (56,57).

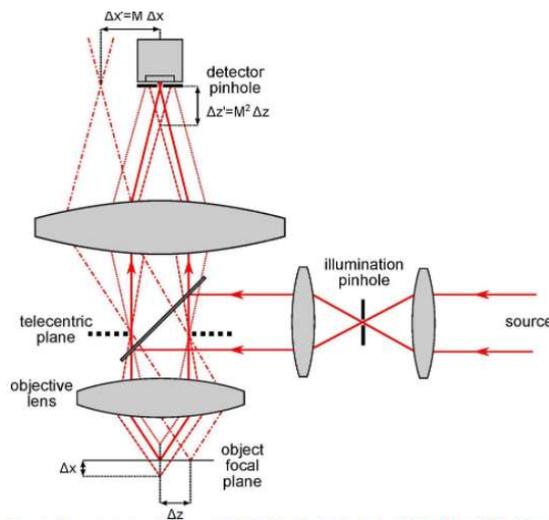


Figura 3.5 configurazione di un microscopio ottico confocale

Il **Phase-shifting interferometry** analizza le variazioni delle altezze della superficie basandosi sui vantaggi delle proprietà delle onde della luce. In particolare, nel PSI viene introdotto uno sfasamento variabile nel tempo tra il fronte d'onda del riferimento e quello del campione. La topografia della superficie dell'oggetto viene solitamente misurata spostando sequenzialmente la fase del raggio di riferimento di quantità note e misurando il pattern di interferenza risultante (la differenza di fase si raggiunge solitamente cambiando il percorso ottico dei due raggi attraverso un trasduttore piezoelettrico che sposta lo specchio di riferimento di una frazione di lunghezza d'onda). Le altezze della superficie sono calcolate, poi, dai dati delle frange d'interferenza dopo diverse fasi di elaborazione, incluso un algoritmo per rimuovere le ambiguità di fase. Il PSI fornisce una risoluzione assiale del nanometro, mentre una risoluzione laterale del micrometro. Il limite dello strumento è il suo utilizzo per le superfici ruvide con proprietà ottiche disomogenee; per evitare errori di misurazione è necessario applicarlo nella misurazione di superfici levigate omogenee (38,66).

Il microscopio ottico topografico più utilizzato per le misure topografiche 3D è l'**interferometro CSI**. Questo stesso strumento è stato utilizzato nel lavoro sperimentale. Segue una descrizione più

dettagliata del suo funzionamento anche per comprendere meglio le caratteristiche metrologiche dello strumento che verranno affrontate nei capitoli successivi.

3.1.3 Coherence scanning interferometry-principi

La dipendenza dall'altezza nella variazione della visibilità delle frange di interferenza in un microscopio a interferenza con coerenza ottica fornisce un potente meccanismo di rilevamento senza contatto per la misurazione 3D e la caratterizzazione della superficie. L'interferometria a scansione di coerenza estende le tecniche interferometriche a superfici complesse in termini di rugosità, gradini, discontinuità e film trasparenti (38).



Figura 3.6 CSI Zygo NewView 9000. Lo strumento, utilizzato nel lavoro di ricerca, si trova nel Laboratorio di metrologia superficiale presso il Politecnico di Torino, Italia.

Gli strumenti che si basano sull'interferometria a scansione di coerenza valutano i cambiamenti nell'**intensità** del segnale interferente (38). L'interferenza è un fenomeno dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. Quello che si osserva è che l'intensità (o ampiezza) dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla somma delle intensità associate ad ogni singola onda di partenza.

In generale, si dice che l'interferenza è costruttiva quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità originaria, e distruttiva in caso contrario.

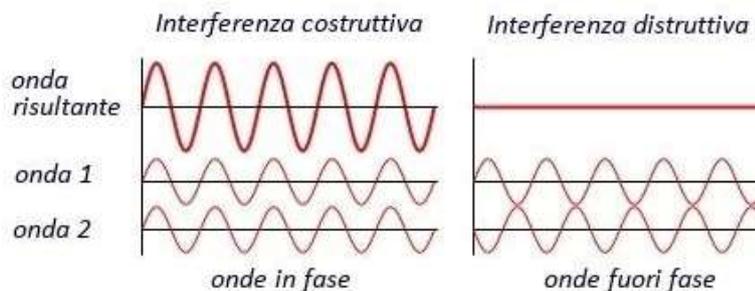


Figura 3.7 interferenza costruttiva e distruttiva nel caso di due onde in fase o fuori fase.

In generale, un microscopio ad interferenza utilizza onde completamente separate che seguono due diversi percorsi ottici: uno attraversa il preparato che lo sfasa, il quale incontra (e si somma) con il secondo non sfasato (*reference*), dando luogo a fenomeni di interferenza.

Nella concettualizzazione più semplice, le altezze della superficie vengono dedotte annotando dove l'effetto di interferenza è più forte.

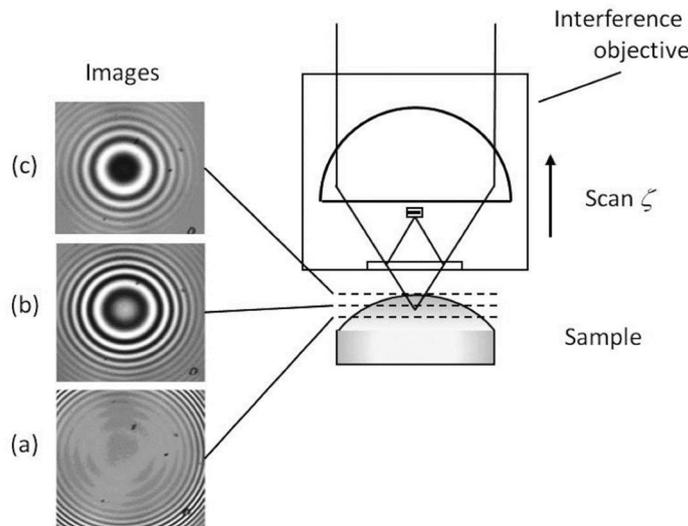


Figura 3.8 Immagini delle frange di interferenza su una superficie curva.

La Figura 3.8 mostra come varia l'aspetto delle frange di interferenza quando un obiettivo di interferenza viene scansionato verticalmente lungo il suo asse ottico: i bordi esterni del campione devono essere più bassi del centro, cioè il provino ha una curvatura.

Gli strumenti CSI sono sistemi automatizzati con acquisizione elettronica dei dati che forniscono un segnale da ogni pixel dell'immagine in funzione della posizione di scansione.

3.1.3.1 Configurazione di uno strumento CSI

L'altezza h dell'oggetto da analizzare varia in base alla superficie dell'oggetto. Uno scanner meccanico fornisce una scansione regolare e continua dell'obiettivo nella direzione z . Durante la scansione, un computer registra i dati di intensità Y per ogni punto o pixel dell'immagine nei diversi frame acquisiti dalla telecamera CCD. Le sorgenti luminose per CSI sono incoerenti (**luce bianca**) (35,38).

In Figura 3.9 è rappresentata la configurazione di uno strumento CSI e il percorso dei raggi al fine di formare il segnale interferente.

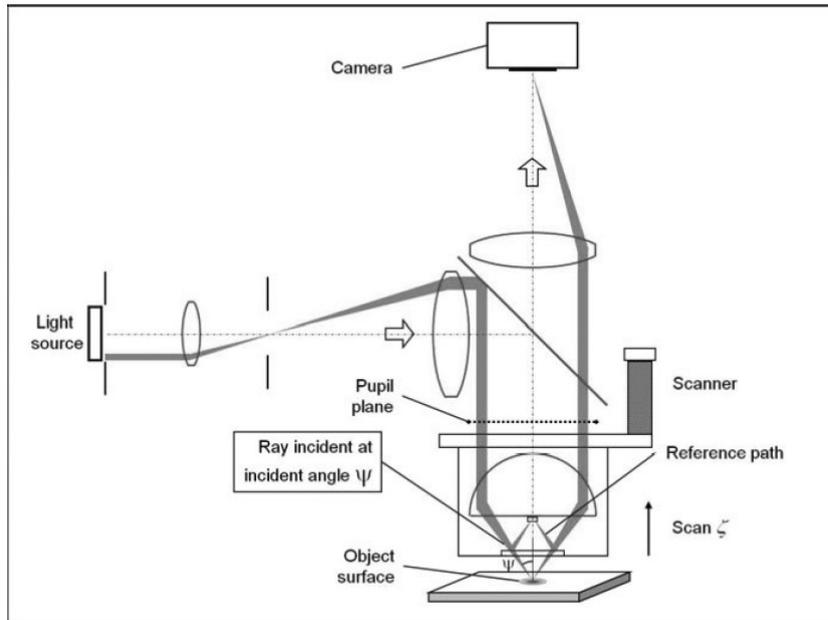


Figura 3.9 Geometria di un microscopio ad interferenza configurata per un CSI.

Il microscopio presenta:

- Una sorgente di luce bianca;
- 2 *beamsplitter* i quali hanno il compito di indirizzare il percorso dei raggi;
- Uno specchio di riferimento;
- Uno scanner;
- Una telecamera CCD.

La luce bianca viene emessa dalla sorgente luminosa i cui raggi impattano contro il primo *beamsplitter*. I raggi vengono deviati e raggiungono il secondo *beamsplitter*. Il secondo *beamsplitter* divide i raggi e in particolare:

- Il primo raggio incide contro lo specchio di riferimento, viene riflesso, incide contro il *beamsplitter* e viene indirizzato verso la telecamera;
- Il secondo raggio continua il suo percorso e incide contro l'oggetto da analizzare, viene rifratto e indirizzato verso la telecamera.

Da qui, si crea il segnale interferente che è la somma di tutti i contributi di interferenza coerente dei fasci di raggi passanti attraverso il piano pupillare dell'obiettivo e riflettenti dall'oggetto e dallo specchio di riferimento.

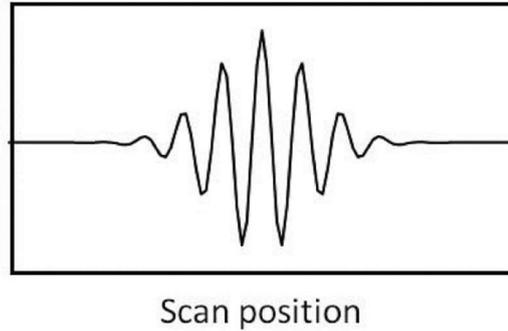


Figura 3.10 formazione del segnale in funzione della posizione di scansione

Al fine di valutare il segnale interferente, questo viene filtrato passa-basso al fine di ottenere l'involuppo, mostrato in figura.

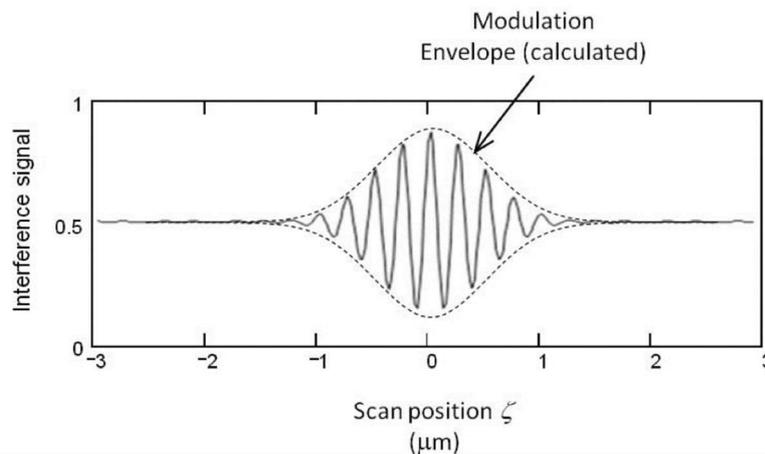


Figura 3.11 segnale CSI per un pixel singolo che mostra l'involuppo di modulazione.

In generale, le altezze della superficie vengono calcolate analizzando dove l'effetto di interferenza è più forte, quindi nello specifico valutando dove l'involuppo del segnale presenta il suo massimo.

3.1.3.2 Obiettivi interferometrici

Gli obiettivi più comuni utilizzati con il CSI sono mostrati nella Figura 3.12: l'interferometro di Mirau e Michelson (35). Mentre quello di Linnik, meno utilizzato, è una soluzione intermedia tra i due (costituito da due obiettivi e un divisore di fascio in mezzo).

La scelta degli obiettivi dipende da tre caratteristiche: la superficie da misurare, la distanza di lavoro e l'ingrandimento degli obiettivi (35,66). L'interferometro di Michelson è adatto per ingrandimenti bassi, distanze di lavoro lunghe e basse aperture numeriche. La peculiarità di questo interferometro è avere lo specchio di riferimento laterale. L'interferometro di Mirau è utilizzato per ingrandimenti superiori al 10x e per distanze di scansione molto minori. È costituito da due piani di vetro: quello inferiore funge da divisore di raggi, mentre in quello superiore troviamo lo specchio di riferimento.

Parlando di caratteristiche ottiche degli obiettivi interferometrici, occorre ricordare come l'apertura numerica NA ($NA = n \sin \theta$, n : indice rifrazione mezzo, θ : semi-apertura dell'angolo) è un parametro fondamentale ed è correlato con il potere risolutivo dell'obiettivo. Maggiore è il parametro, infatti, a parità di focale, migliore è la capacità di distinguere due caratteristiche. In particolare, la risoluzione laterale del sistema può essere definita dal criterio di *Raleigh* come:

$$r = 0,61 \frac{\lambda}{NA} \quad (3.2)$$

dove λ è la lunghezza d'onda media della luce. Secondo il criterio di *Sparrow*, invece, la costante è 0.82 (36,37).

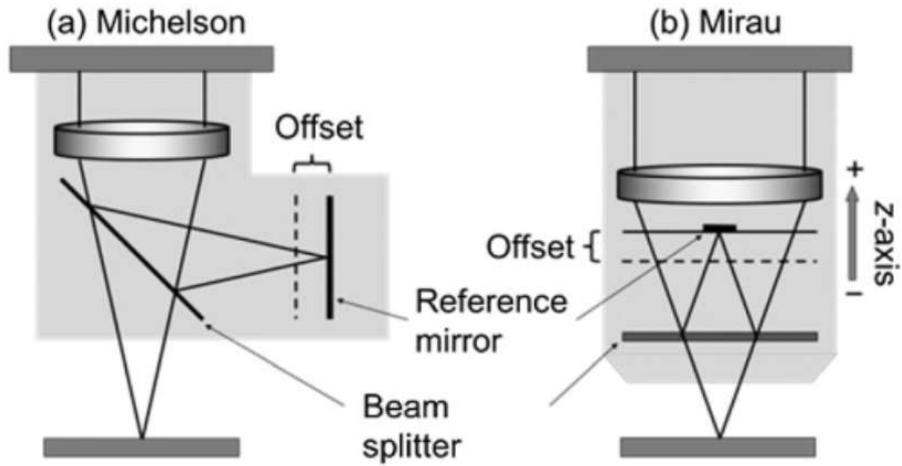


Figura 3.12 Configurazione interferometro di Michelson (a) e di Mirau (b).

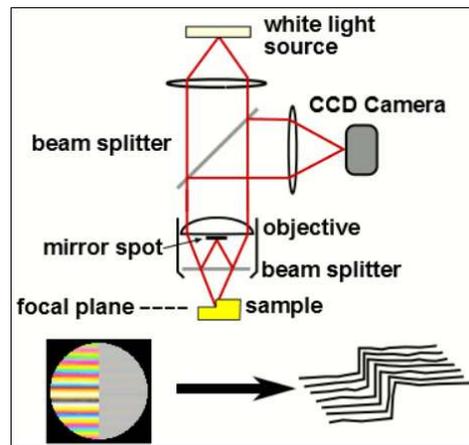


Figura 3.13 Frange di interferenza rilevate durante lo spostamento verticale dell'obiettivo di Mirau in un CSI.

3.2 Analisi della topografia superficiale

3.2.1 Filtering

Il filtraggio è richiesto per diversi scopi nel processo di analisi della *texture* superficiale, come ad esempio, ripulire i dati da disturbi (rimozione outliers), correggere gli effetti della forma dello stilo sui dati grezzi (filtro morfologico), comparare dati misurati con diversi strumenti, ecc. Ma la ragione principale dell'uso dei filtri è separare componenti di larga scala da componenti di piccola scala di una superficie topografica, in altri termini separare l'ondulazione (*waviness*) dalla rugosità e calcolare i parametri topografici in accordo agli standard (58).

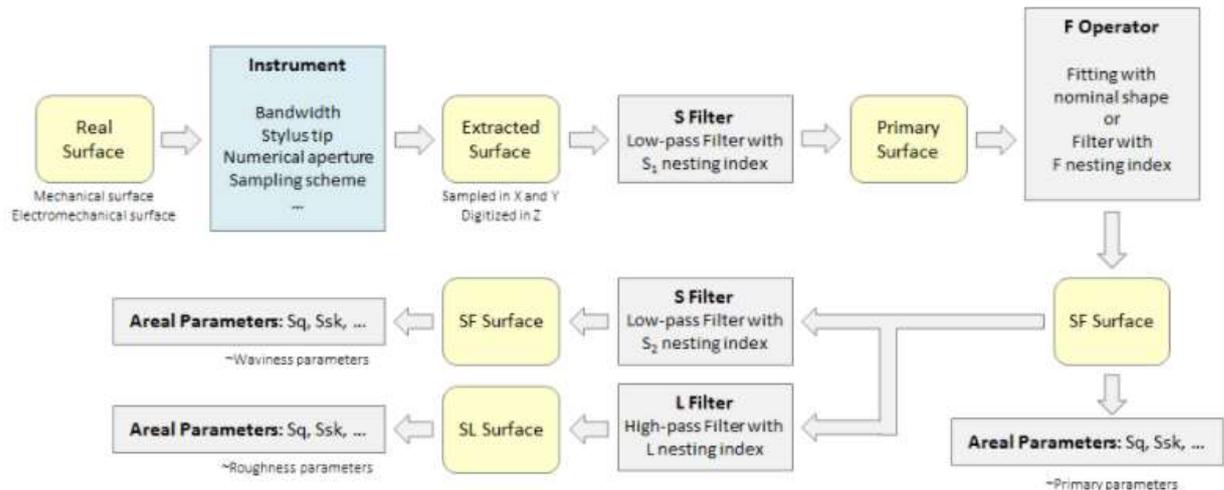


Figura 3.14 operazioni di pre-processing per lo studio della texture superficiale

La Figura 3.14 mostra lo schema da seguire seguendo la norma ISO 25178 parte 3: Attraverso lo strumento topografico viene misurata la superficie reale e viene fornita in output la superficie estratta. La superficie primaria viene ottenuta applicando il filtro-S che è un filtro passa basso in quanto elimina le alte frequenze, data un certo *nesting index*, ovvero un cut-off di taglio espresso in lunghezza d'onda λ_s . Questo filtro rimuove le componenti su piccola scala della superficie misurata, come il rumore o gli spikes. Alla superficie primaria, viene eliminata l'errore di forma macrogeometrico attraverso il fitting di una forma nominale (o con una polinomiale) che viene rimossa, oppure attraverso un F-filtro passa alto che elimina le lunghezze d'onda superiori con un nesting index λ_f .

Dopo aver eliminato la forma, può essere utilizzato un L-filtro passa alto per eliminare l'errore microgeometrico dell'ondulazione e avere una superficie di rugosità, oppure, in alternativa può essere usato un filtro passa basso per eliminare la rugosità e poter studiare la *waviness* della superficie (vedi Figura 3.16). Pertanto, i filtri vengono usati in combinazione, come un filtro passa banda, per creare delle superfici limitate in scala S-F e S-L come mostra la Figura 3.15 (58,35).

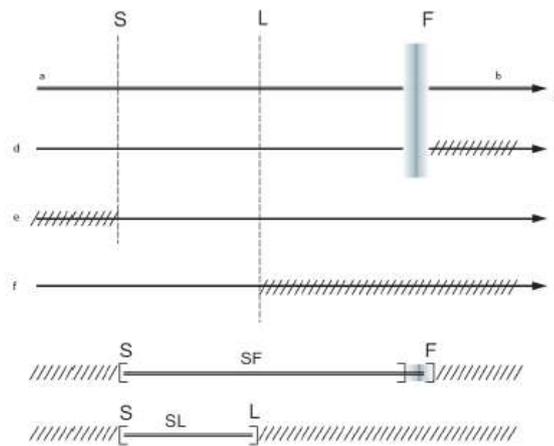


Figura 3.15 relazione tra S-filtro, L-filtro, F-operatore e superfici S-F e S-F.

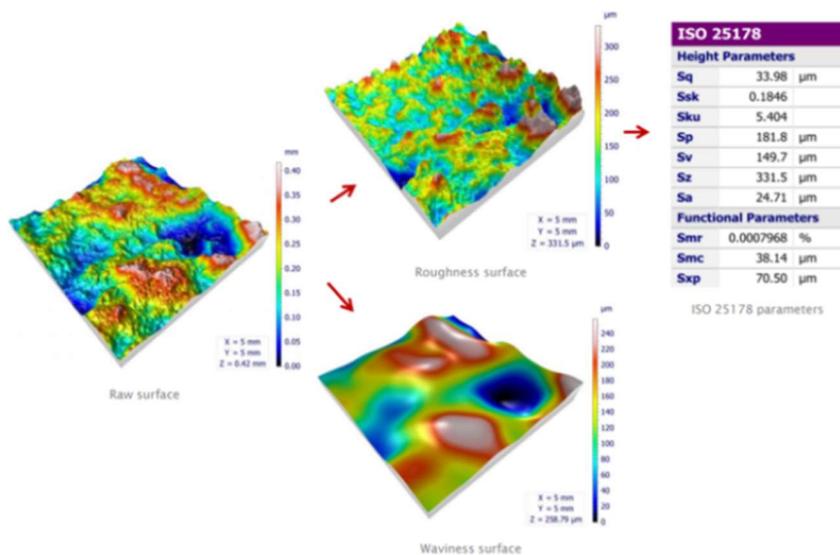


Figura 3.16 rappresentazione 3D del profilo primario ed estrazione della superficie di rugosità e di ondulazione.

Il concetto di *nesting index* è l'estensione del *cut-off* di lunghezza d'onda usato nell'analisi dei profili ma adattabile per tutti i filtri, non solo il filtro gaussiano ma anche i filtri morfologici e i *spline filter*. Ovvero serve per definire la lunghezza d'onda alla quale il filtro attenua l'ampiezza del 50%. Significa anche che questa lunghezza d'onda viene trasmessa al 50%. Per una determinata lunghezza d'onda la caratteristica del filtro rappresenta il rapporto tra l'ampiezza della funzione sinusoidale prima del filtraggio e l'ampiezza della funzione sinusoidale dopo il filtraggio. I filtri, in un'analisi nel dominio delle frequenze, vanno applicati alla trasformata di Fourier discreta (FFT) della superficie topografica: la funzione discreta rilevata, ovvero il campionamento della superficie, viene considerata come somma di sinusoidi con una determinata ampiezza, fase e frequenze crescenti pari a nf con $f=1/\lambda$ e $n \in N$. Oppure i filtri possono essere applicati per convoluzione attraverso una matrice di filtraggio.

Le tipologie di filtri utilizzati sono diverse, tra quelli più utilizzati abbiamo i seguenti (33,35,58):

- **Filtro gaussiano:** è un filtro passa-basso che produce il profilo di ondulazione (superficie media). Sottraendo questa superficie media dal profilo primario si ottiene la superficie di rugosità. La Figura 3.17 mostra la trasmissione caratteristica di alcuni di questi filtri. Un'evoluzione di questi sono i **filtri robusti gaussiani**, che eliminano i disturbi degli outliers in quanto si basano su un algoritmo iterativo che calcola pesi locali basati sulla distanza tra

il profilo primario e il profilo di ondulazione. Perciò i filtri robusti sono preferibili in presenza di pori, forme e superfici strutturate.

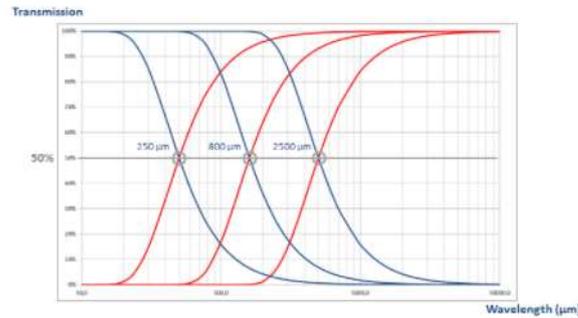


Figura 3.17 trasmissione caratteristica per diversi cut-off di filtri di rugosità (blu) e waviness(rosso)

- **Spline cubiche:** Le spline cubiche sono curve geometriche che collegano uniformemente una serie di punti come mostrato in Figura 3.18.

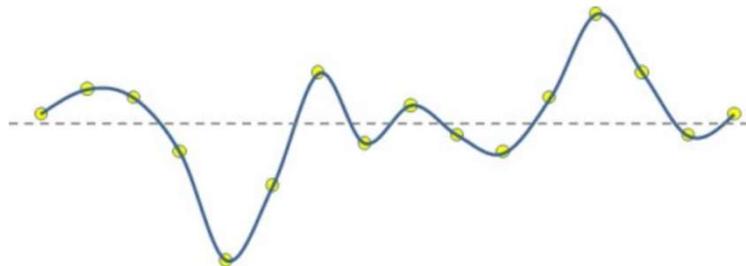
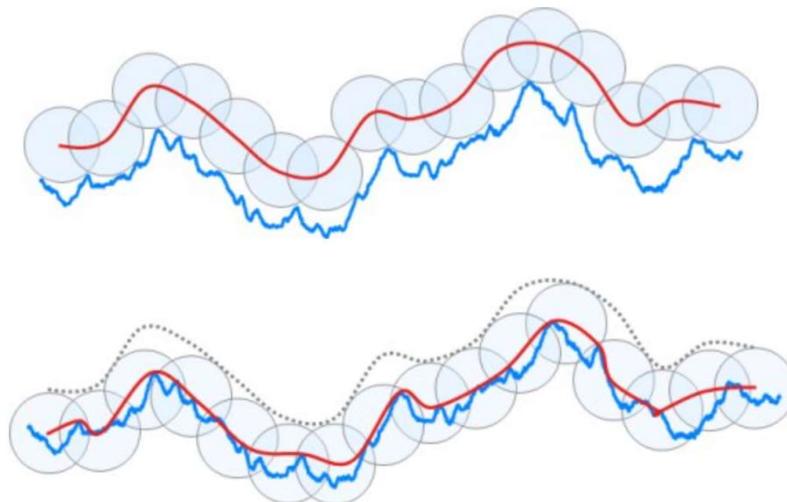


Figura 3.18 punti rilevati connessi da curve a spline

- **Filtro morfologico:** Un filtro morfologico si basa su due operazioni morfologiche, dilatazione ed erosione, che agiscono utilizzando un elemento strutturante di una data dimensione. Ad esempio, il profilo sottostante è dilatato da un disco di un certo raggio. Il disco rotola sulla superficie e viene registrato il percorso del suo centro (linea rossa). La



dilatazione tende ad allargare i picchi e riempire i buchi. Gli elementi strutturanti possono essere teoricamente di qualsiasi forma. Se il disco viene fatto rotolare sotto la superficie, si parla di erosione. Quando alla dilatazione segue l'erosione, si parla di chiusura morfologica che è un filtro morfologico che crea l'involuppo superiore. Il disco viene fatto rotolare sotto

la linea tratteggiata grigia di dilatazione. Quando all'erosione segue la dilatazione si parla di apertura morfologica che è un filtro morfologico che crea l'involuppo inferiore.

3.2.2 Parametri 3D della *texture* superficiale

Per lungo tempo la metrologia superficiale è stata caratterizzata dall'utilizzo di profilometri 2D con l'utilizzo di metriche basate sull'analisi dei profili. A partire dagli anni '90, grazie all'introduzione di interferometri a luce bianca e profilometri 3D sono iniziate le procedure per la standardizzazione e la formalizzazione internazionale dell'analisi 3D della tessitura superficiale e l'analisi dimensionale (GPS: Geometrical Product Specification and Verification). In particolare, nella parte 2 della norma ISO 25178 pubblicata nel 2012 sono confluite le definizioni dei parametri superficiali. Segue una trattazione dei parametri di campo principali (*field parameters*), ovvero quelli che si riferiscono a tutti i punti misurati dell'area di valutazione (in opposizione ai *feature parameters* definiti in seguito a segmentazione), che sono significativi per la caratterizzazione del volume di usura (34,39).

Le regole della denominazione dei parametri derivano dai parametri 2D ma iniziano con la lettera maiuscola S o V. Pertanto, per motivi di semplificazione, verranno utilizzate rappresentazioni bidimensionali per chiarire le definizioni; molti dei parametri 2D infatti, definiti dalla ISO 4287, hanno l'espressione matematica che può essere estesa in 3D. La differenza principale è che, mentre i parametri 2D riflettono la natura del profilo, distinguendo tra rugosità, ondulazione o profilo primario (*Pa, Ra, Wa*), il prefisso dei parametri 3D no (abbiamo solo *Sa*). Quindi il fatto che un dato parametro si riferisca alla superficie grezza, alla rugosità oppure all'ondulazione, dipende dal tipo di filtro utilizzato prima del calcolo. Pertanto, è necessario fornire le condizioni di filtraggio (34,39).

Inoltre, con i parametri areali è definito ancora il concetto di **area di campionamento** e **area di valutazione**, ma di default ad ogni area di valutazione corrisponde un'area di campionamento. Una valutazione statistica può essere fatta facendo più misure sulla stessa superficie che si vuole analizzare. La norma ISO 4288 (parametri di profilo) invece, definisce il parametro per ogni lunghezza di campionamento e poi un valore medio viene calcolato (tipicamente su 5 lunghezze di campionamento). Perciò se il profilo originale deve essere filtrato con un *cut-off* di lunghezza 0,8 mm per ottenere il profilo di rugosità, la lunghezza di campionamento sarà esattamente pari al *cut-off* di lunghezza e la lunghezza di valutazione sarà 4 mm come in Figura 3.19.

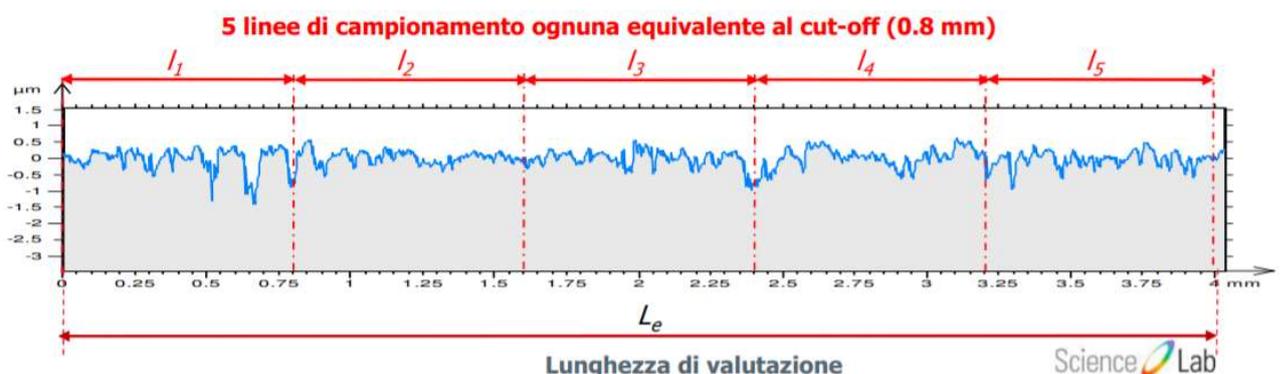


Figura 3.19: il parametro appartenente alla famiglia R-parametri è calcolato come media su 5 lunghezze di campionamento

Nel caso tridimensionale la funzione dell'altezza è espressa come $z(x, y)$; nelle equazioni la funzione è intesa come centrata, ovvero l'altezza media calcolata sull'area è già sottratta dalle altezze. Questo permette di semplificare le formule analitiche dei parametri.

3.2.2.1 Parametri di altezza

I parametri di altezza riguardano la distribuzione statistica dei valori di altezza lungo l'asse z, che verrà definita in seguito; questi parametri sono i più simili ai parametri 2D e per questo molto apprezzati.

FAMIGLIA	SIMBOLO	DESCRIZIONE
PARAMETRI DI ALTEZZA	Sq	Radice quadrata dell'altezza media quadratica
	Sa	Valor medio assoluto dell'altezza
	Ssk	Skewness della distribuzione altezze
	Sku	Curtosi distribuzione delle altezze
	Sz	Altezza massima della superficie

Figura 3.20 parametri di altezza principali

S_a è l'estensione di R_a (valor medio assoluto delle altezze di un profilo) a una superficie. Esprime la media delle altezze della superficie, in valore assoluto. La superficie è intesa come centrata, ovvero \bar{Z} pari a zero. Questo parametro viene utilizzato generalmente per valutare la rugosità superficiale.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint |Z(x, y) - \bar{Z}| dx dy = \frac{1}{A} \iint |Z(x, y)| dx dy \quad (3.3)$$

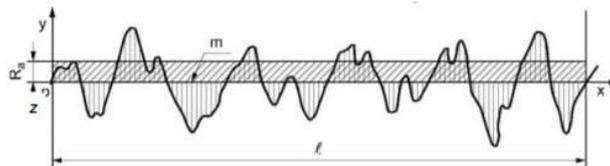


Figura 3.21 Rappresentazione media aritmetica dell'altezza in un profilo

S_q rappresenta la radice quadrata della media delle ordinate al quadrato all'interno dell'area di definizione. Ha un significato maggiormente statistico in quanto è la deviazione standard della curva di densità di probabilità delle altezze. È importante anche il suo significato fisico, in quanto è un parametro direttamente correlato all'energia superficiale e le proprietà ottiche della superficie; può essere definito come:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint Z^2(x, y) dx dy} \quad (3.4)$$

S_{sk} descrive la forma della distribuzione dell'altezza. È il rapporto tra la media delle altezze al cubo e il cubo dello scarto tipo Sq , valutato nell'area campionata A (adimensionale). Per una superficie con distribuzione delle altezze casuale (Gaussiana) che ha una distribuzione simmetrica, la skewness è zero; il parametro, come mostrato in figura, può avere valore positivo o negativo, in relazione alla distribuzione della massa di materiale, se sopra o sotto rispetto la linea media.

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \frac{1}{A} \iint Z^3(x, y) dx dy \quad (3.5)$$

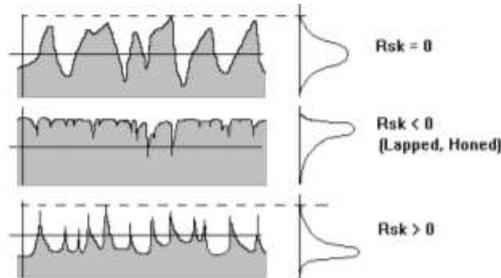


Figura 3.22 Esempi di asimmetria della distribuzione delle altezze

S_{ku} è uno degli indici relativi alla forma di una distribuzione, che costituisce una misura dello "spessore" delle code della funzione di densità delle altezze, ovvero il grado di "appiattimento" della distribuzione; è definito come il rapporto tra la media delle altezze alla quarta e la quarta potenza dello scarto tipo Sq . Una superficie con distribuzione Gaussiana delle altezze ha il valore di curtosi pari a 3. Permette sia di capire dove gli spikes sono distribuiti sia di quantificarli come in Figura 3.23.

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \frac{1}{A} \iint Z^4(x, y) dx dy \quad (3.6)$$

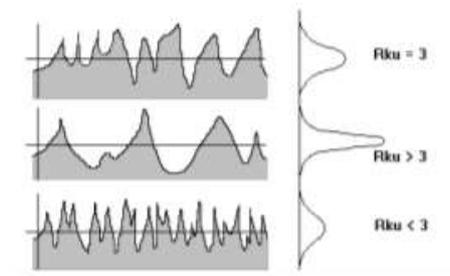


Figura 3.23 Esempi relativi alla curtosi della distribuzione delle altezze.

L'altezza massima della superficie S_z è definita come somma dei valori assoluti di S_p e S_v :

$$S_z = S_p + |S_v| = S_p - S_v \quad (3.7)$$

dove S_p è l'altezza rispetto al piano medio del punto più alto della superficie, mentre S_v è l'altezza del punto più basso. Questa grandezza è molto sensibile ai picchi isolati, quindi bisogna usarla con cautela dopo opportune operazioni di filtraggio.

3.2.2.2 Parametri funzionali

I parametri funzionali sono legati alla distribuzione delle altezze e alla sua curva cumulata (curva Abbott-Firestone), e sono finalizzati a caratterizzare il comportamento funzionale della superficie, come usura, lubrificazione, contatto. Sono globali (parametri di campo) e possono essere visti come parametri statistici (59).

Da tempo l'industria meccanica, ed in particolare quella automobilistica, ha cercato di trovare modi per ottimizzare la definizione dei parametri per renderli più efficaci e migliorare la loro correlazione con i fenomeni funzionali. La caratterizzazione funzionale della *texture* superficiale è di fondamentale importanza per tutte le parti meccaniche che sono accoppiate, ovvero per tutte le parti ad eccezione di quelle estetiche (59).

3.2.2.2.1 Curva della distribuzione di altezza-Curva rapporto materiale (curva di Abbott-Firestone)

Occorre introdurre il concetto di analisi statistica della superficie topografica, come preliminare all'introduzione di questa famiglia di parametri. Invece di tentare di descrivere la superficie come singoli parametri, è più accurato usare un set di indicatori che siano rappresentativi di funzioni statistiche come la funzione di densità di probabilità delle altezze oppure la rispettiva cumulata.

La curva di densità delle ordinate è una funzione che fornisce la probabilità che in una qualsiasi posizione dell'area di valutazione, 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 (*bin*) e tracciando l'istogramma in cui l'altezza della barra rappresentativa di una classe sia il numero di punti che stanno in quella classe, diviso l'ampiezza della classe stessa. La Figura 3.24 mostra la costruzione dell'istogramma, nel caso di un profilo.

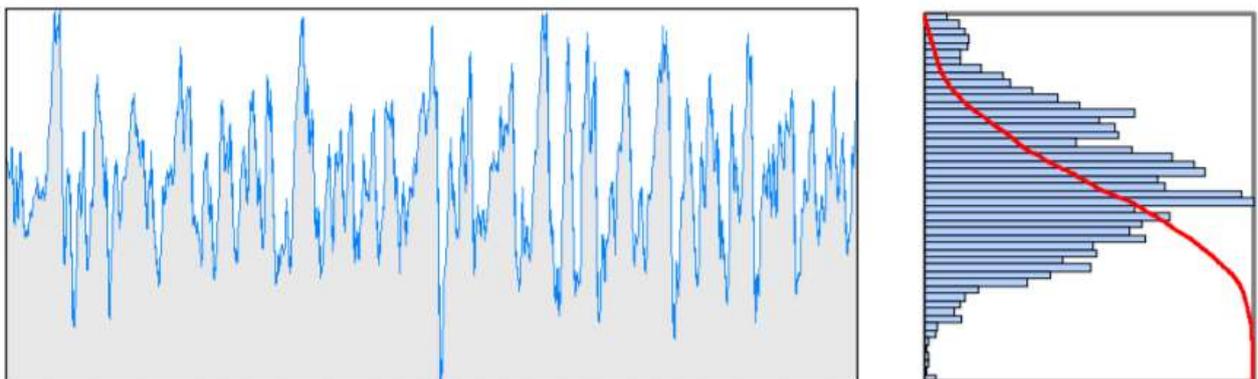


Figura 3.24 profilo di altezze (a sinistra) e distribuzione discreta delle altezze (a destra)

La curva di Abbott-Firestone, invece, matematicamente è l'integrale della curva di densità delle altezze e rappresenta quindi una distribuzione di probabilità cumulativa. Nel caso dei profili, normalmente si calcola l'integrale partendo dal picco più alto del profilo (dove la curva è 0%) fino al punto più basso (100%) (ISO 4287): in questo modo ogni valore della curva ottenuta, rappresenta la frazione lineare del profilo che sta al di sopra dell'altezza considerata. Infatti, la curva rappresenta la percentuale della lunghezza portante del profilo (rapporto materiale superficiale in 3D) in funzione del livello (o profondità di taglio c) come mostrato in figura 3.25. Tuttavia, questa non è una

soluzione robusta in quanto può essere affetta dalla presenza di *outliers*. Nell'analisi areale, invece, garantendo una definizione più robusta dei parametri di rapporto materiale, il valore di c è calcolato dal piano medio.

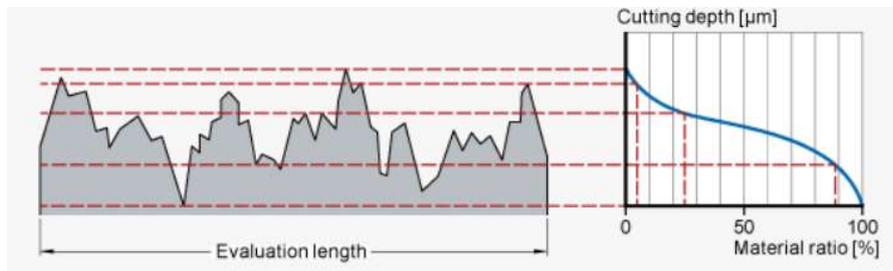


Figura 3.25 costruzione curva di Abbott-Firestone

La Figura 3.26 mostra i parametri di rapporto materiale superficiali più significativi. In particolare, sulla curva di Abbott, la funzione $Smr(c)$ fornisce il rapporto materiale p di una certa area di valutazione, espresso come percentuale, corrispondente ad una specifica altezza c , che è fornita come parametro. La funzione inversa, ovvero la quota c dato un certo rapporto materiale, è denominata $Smc(p)$.

FAMIGLIA	SIMBOLO	DESCRIZIONE
PARAMETRI DI RAPPORTO MATERIALE	Smr	Rapporto materiale superficiale
	Sdc	Differenza della sezione superficiale
	Smc	Rapporto inverso del materiale superficiale
	Sxp	Altezza del picco estremo

Figura 3.26 parametri di rapporto materiale più utilizzati

I parametri Sdc o Sxp , invece, caratterizzano l'ampiezza della superficie dopo la rimozione degli outliers, come ampiezza totale (superficie compresa tra il 2% e 98% del rapporto materiale superficiale, ad esempio) o del picco dal piano mediano di riferimento (compresa tra il 2% e 50% del rapporto materiale).

3.2.2.2.2 Parametri volumetrici

Questa famiglia di parametri è la più importante per la descrizione del fenomeno di usura; i più significativi sono descritti in Figura 3.27.

FAMIGLIA	SIMBOLO	DESCRIZIONE
PARAMETRI VOLUMETRICI	V_{mp}	<i>Volume del Materiale dei picchi</i>
	V_{mc}	<i>Volume del Materiale del nucleo</i>
	V_{vv}	<i>Volume vuoto delle valli</i>
	V_{vc}	<i>Volume vuoto del nucleo</i>

Figura 3.27 Lista parametri volumetrici

Il volume vuoto ad una data altezza o parametro $V_v(mr)$, è il volume vuoto calcolato per un rapporto materiale mr . È calcolato integrando il volume racchiuso sopra la superficie e sotto un piano orizzontale definito ad una certa altezza $h=S_{mc}(mr)$. Può essere descritto come:

$$V_v(mr) = k \int_{mr}^{100\%} [S_{mc}(mr) - S_{mc}(q)] dq \quad (3.8)$$

dove K è un fattore che converte il volume nell'unità richiesta, ad esempio [μm^3]. Il Volume vuoto è massimo per $mr=0\%$, mentre vale zero per $mr=100\%$. Può essere rappresentato sulla curva di Abbott-Firestone come mostrato in Figura 3.28.

Il volume materiale ad una data altezza $V_m(mr)$ è il volume materiale calcolato per un certo rapporto mr . Il parametro è calcolato integrando il volume racchiuso sotto la superficie e sopra un piano orizzontale definito alla quota $h=S_{mc}(mr)$:

$$V_m(mr) = k \int_0^{mr} [S_{mc}(q) - S_{mc}(mr)] dq \quad (3.9)$$

Come mostra la Figura 3.28, una ulteriore distinzione può essere fatta tra *peak* e *core* dei due parametri volumetrici definiti; ad esempio, nel caso del volume materiale avremo:

$$V_{mp} = V_m(mr1) \quad (3.10)$$

$$V_{mc} = V_m(mr2) - V_m(mr1) \quad (3.10.1)$$

dove $mr1$ e $mr2$, sono dei rapporti materiale superficiali fissati, rispettivamente al 10% e 80%. Queste percentuali sono utili per definire il volume V_{mp} che viene rimosso durante lo strisciamento tra diverse componenti oppure la parte di superficie materiale che non interagisce nel contatto e non ha un ruolo nella lubrificazione. Considerazioni analoghe possono essere fatte per il volume vuoto.

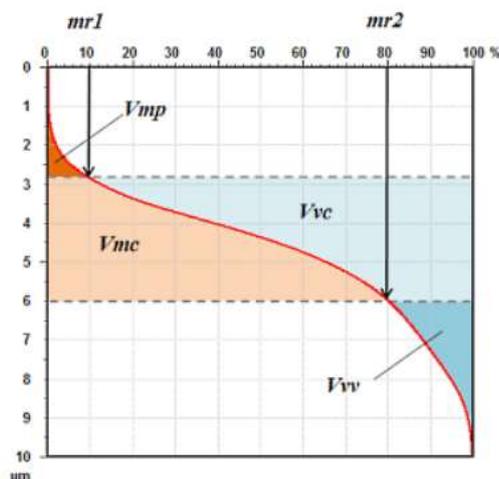


Figura 3.28 Rappresentazione grafica sulla curva di Abbott-Firestone dei parametri di volume

3.2.2.3 Parametri spaziali e parametri ibridi

I parametri spaziali sono misure che permettono di definire l'isotropia di una superficie. Una superficie viene detta isotropa quando presenta caratteristiche identiche indipendentemente dalla direzione di misura. Questo è il caso di superfici con una *texture* casuale, senza alcuna trama che risalti. La maggior parte delle superfici tecnologiche però, presentano una superficie orientata o periodica, residuo delle lavorazioni industriali da cui sono fabbricate. In questo caso le superfici vengono dette anisotrope (39,59).

Per quantificare l'isotropia, è necessario definire l'autocorrelazione.

Nell'elaborazione delle immagini, una funzione di autocorrelazione (ACF) è una misura del rapporto di convoluzione tra un'immagine resa in coordinate diverse (shift di τ_x , τ_y) e l'immagine originale.

$$ACF(\tau_x, \tau_y) = \frac{\iint Z(x,y)Z(x-\tau_x,y-\tau_y)dxdy}{\iint Z^2(x,y)dxdy} \quad (3.11)$$

Per come è definita, l'immagine della funzione ACF è un valore tra -1 e +1 per ogni punto della superficie. In particolare, +1 significa perfetta correlazione (mentre 0 nessuna correlazione) e rappresenta il massimo della funzione, in corrispondenza di uno shift pari a zero. Il plot della funzione infatti, include un tipico picco centrale, con un'ampiezza standard di 1. In alcuni casi l'immagine della funzione include picchi secondari che indicano correlazioni minori, dovute a motivi periodici o pseudoperiodici. Ciò che è interessante ai fini dello studio dell'isotropia è caratterizzare la forma di questo picco come mostrato in Figura 3.29. È significativo capire come decresce, se repentinamente o gradualmente.

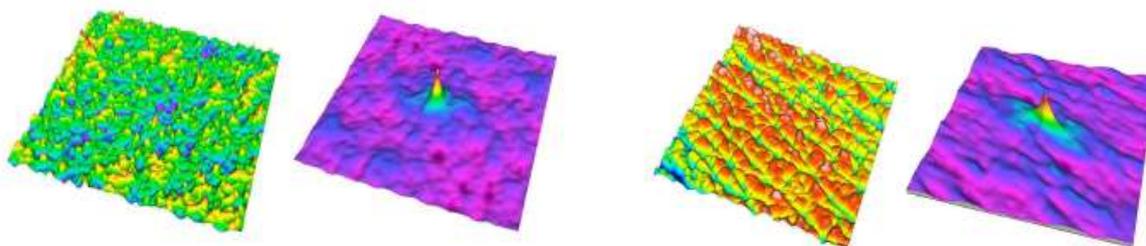


Figura 3.29 una superficie isotropa e la sua funzione di autocorrelazione (a sinistra), una superficie anisotropa e la sua funzione di autocorrelazione (a destra)

In particolare, viene applicata convenzionalmente una soglia di 0,2 e si valuta la porzione del picco rimanente dopo il *thresholding* proiettata sul piano di τ_x, τ_y (il lobo centrale). Le dimensioni caratteristiche del lobo possono essere definite da un raggio massimo R_{max} e un raggio minimo R_{min} .

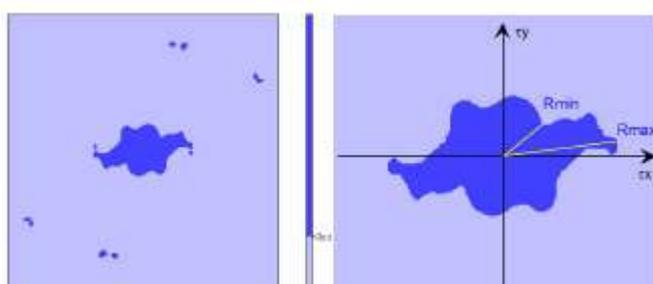


Figura 3.30 il lobo centrale con le sue dimensioni caratteristiche dopo il *thresholding* di 0,2.

I due indicatori che fungono da parametri spaziali si basano su queste dimensioni caratteristiche come mostrato in Figura 3.31.

Parametro	Formulazione analitica	Interpretazione
Velocità di decadimento del tasso di autocorrelazione Sal	$Sal = \min \sqrt{tx^2 + ty^2}$	Per una superficie anisotropa, Sal è la direzione perpendicolare alla componente superficiale caratteristica. Un valore alto denota che la superficie è dominata da una frequenza spaziale bassa di componenti e viceversa.
Rapporto di aspetto della tessitura di superficie Str	$Str = \frac{Rmin}{Rmax}$	È un parametro dimensionale tra 0 e 1. Se è vicino all'unità allora la superficie è isotropa, se è vicino allo 0 allora la texture ha una dimensione dominante.

Figura 3.31 parametri spaziali

I **parametri ibridi** sono combinazioni tra parametri di ampiezza e spaziatura, utilizzati per valutare il gradiente medio della superficie (Sdq , radice quadrata del gradiente medio di superficie) oppure il rapporto tra la superficie involupata e quella proiettata (Sdr , che approssima la superficie locale mediante la tecnica delle triangolazioni tra 4 punti adiacenti). Eventuali mutamenti che si verificano per i parametri di ampiezza o spaziatura possono avere effetti sui parametri ibridi. Nell'analisi tribologica la pendenza della superficie, la curvatura della superficie e l'area di sviluppo sono considerati fattori importanti che influenzano le proprietà delle superfici.

3.3 Metodi volumetrici basati sulle misure della topografia superficiale

La letteratura scientifica più recente ha fornito la trattazione di metodi che sfruttano la topografia per la caratterizzazione del volume d'usura. Gli approcci principali che possono essere distinti sono due: uno numerico che si basa sull'estrazione dei profili e uno che si basa sui parametri di volume della superficie già introdotti. Un vantaggio di questi metodi, diversamente da quelli standard basati sui profili, è il fatto che riescano a fornire non solo il volume medio di usura ma anche il volume dei valori singoli. Il caso di studio, però, affinché possa essere confrontabile con i metodi tradizionali, presenterà i risultati di caratterizzazione e incertezza riferiti ai valori medi.

Entrambi questi metodi richiedono però, prima dell'applicazione, degli step preliminari necessari. In prima battuta, sulla superficie topografica scansionata dal CSI deve essere fatta un'operazione di filtraggio, ottenendo una superficie limitata in scala S-F mediante gli operatori standard S- ed F-, con lo scopo di rimuovere il rumore di misura ad alta frequenza e la forma macrogeometrica della superficie come già detto (34,39). Inoltre, attraverso l'estrazione di una regione di interesse ROI (*Region of Interest*), deve essere identificata nel caso del tribo-test lineare di modello la traccia di usura mentre l'area di interesse per la caratterizzazione del danno da fretting nel caso del fianco del dente dell'albero scanalato, ossia solo la parte che effettivamente ingrana con la controparte. Si escludono così dal calcolo computazionale gli effetti di rugosità e di caratteristiche topografiche che non sono correlate ai test tribologici. Questa operazione può essere fatta manualmente (come nel caso di utilizzo del software *MountainsMap*) oppure può essere automatizzata scrivendo un codice di estrazione della ROI o usando delle tecniche di segmentazione.

È necessario misurare la superficie testata due volte, prima e dopo il tribo-test. La valutazione della superficie usurata viene fatta dopo un'operazione di sottrazione tra le due superfici topografiche scansionate (46,60). Questo avviene solo dopo aver fatto un'opportuna registrazione tra le misurazioni affinché siano in coordinate omogenee come già descritto nel capitolo precedente. La differenza tra le superfici topografiche ed eventuali ulteriori rimozioni di forma, con il *fitting* di polinomiali, sono state utilizzate nello studio sperimentale condotto come tecniche di filtraggio della superficie topografica sostitutive all'applicazioni degli operatori S- e F-.

- **Metodo automatico (*MountainsMap*):** Questo metodo topografico è completamente automatico ed è già implementato in numerosi software di uso commerciale per la caratterizzazione della superficie topografica come *MountainsMap*, da cui il nome del metodo. La direzione di scansione del profilo è l'asse x mentre l'asse y è ortogonale a questa direzione di scansione. Il software estrae un gran numero (N) di profili $z(x)$ lungo la direzione ortogonale alla direzione di scansione e calcola il volume del danno totale di usura come:

$$V_{aut} = d_y \sum_{j=2}^{N-1} S_j + \frac{d_y}{2} (S_1 + S_N) \quad (3.12)$$

Dove d_y è la distanza di campionamento lungo l'asse y (61,62) e S_j è l'area di ciascun profilo estratto. La formula mostra che ogni superficie trasversale, ai fini del calcolo del volume, insiste su un passo pari a d_y , eccetto la prima e ultima superficie, rispettivamente S_1 e S_N , che insistono su un passo pari a $\frac{d_y}{2}$.

Per distinguere i contributi di *wear* e *galling* dal calcolo del danno totale, è necessario, in via teorica, valutare un piano di riferimento che rappresenti la quota della superficie indeformata. Per fare questo,

un metodo pratico può essere quello di *fittare* sulla topografia un piano dei minimi quadrati in una zona esterna alla porzione usurata, in modo che non risenta del contributo delle deformazioni; per poi discriminare le superfici dei picchi e delle valli di ciascun profilo, in base a questa quota.

La sezione trasversale di ciascun profilo estratto in via teorica è l'integrale di $z(x)$, ovvero le altezze z del profilo in funzione dello spostamento laterale, nella direzione di scansione lungo l'asse x . La definizione continua, espressa con gli integrali, assicura la correttezza della definizione e del calcolo, ma le misure dei profili e delle superfici sono sempre campionate e digitalizzate.

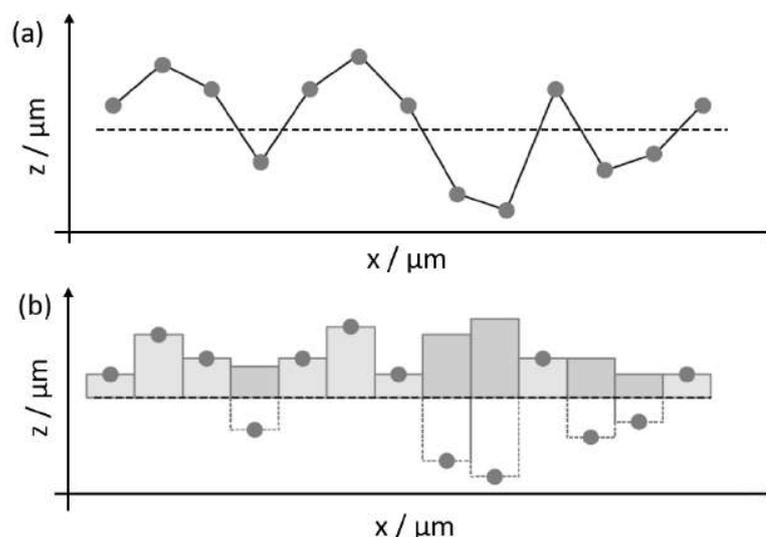


Figura 3.32 (a) interpolazione lineare delle altezze del profilo campionate lungo la direzione x di scansione. (b) metodo dei rettangoli per la valutazione della sezione

Pertanto, nei calcoli pratici e nei software commerciali come MountainsMap, cercando di garantire velocità e accuratezza, vengono implementate le forme discrete e le sommatorie. Un ulteriore aspetto da valutare è quello relativo all'interpolazione dei punti campionati, in quanto influenza l'accuratezza dei calcoli in termini di sovrastima della sezione trasversale. La Figura 3.32 (a) mostra una classica rappresentazione di un profilo dove i punti campionati sono uniti attraverso segmenti lineari. Nel lavoro condotto, e nella maggior parte dei prodotti commerciali, vista l'elevata densità di punti campionati, per efficienza computazionale viene utilizzato il metodo dei rettangoli, come mostrato in Figura 3.32 (b), ovvero un'integrazione basata sulla semplice somma delle altezze in valore assoluto (39). Dunque, un modo per calcolare S_j è il seguente:

$$S_j = d_x \sum_{i=1}^M |z_i| \quad (3.13)$$

Dove M è il numero di punti campionati lungo il profilo e d_x è il passo di campionamento laterale, cioè la risoluzione laterale lungo l'asse x .

- **Metodo dei parametri volumetrici (Abbott-Firestone):** Questo secondo approccio (39,63,64) è basato sui parametri volumetrici e permette di calcolare il volume totale del danno V_{VP} come:

$$V_{VP} = V_m(m_r) + V_v(m_r) \quad (3.14)$$

In particolare, i volumi $V_m(m_r)$, $V_v(m_r)$ sono il volume vuoto e il volume materiale introdotti nel paragrafo precedente, calcolati data una certa quota h e un rapporto superficiale materiale m_r della

curva di Abbott-Firestone dello studiabile. In particolare, si può impostare la seguente relazione tra i parametri volumetrici e i contributi del danno di usura:

$$V_{galling} = V_m(m_r) = K \int_{0\%}^{m_r} (S_{mc}(p) - S_{mc}(m_r)) dp \quad (3.14.1)$$

$$V_{wear} = V_v(m_r) = K \int_{m_r}^{100\%} (S_{mc}(m_r) - S_{mc}(p)) dp \quad (3.14.2)$$

La Figura 3.33 rappresenta i due parametri graficamente, data la curva di rapporto materiale superficiale della topografia $S_{mr}(c)$.

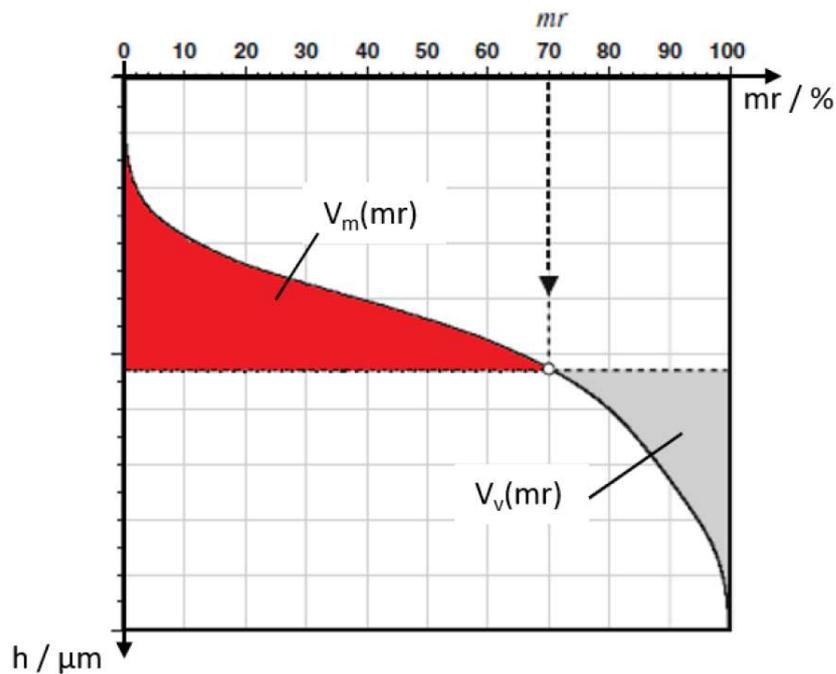


Figura 3.33 parametri del volume materiale e volume vuoto

Si nota dalle definizioni e dal grafico l'importanza di definire correttamente il piano orizzontale di taglio $h=S_{mc}(m_r)$, dato un certo rapporto superficiale m_r , rispetto al quale riferire i calcoli degli integrali. Il piano medio delle altezze o il piano dei minimi quadrati delle altezze calcolati esterni al *crop*, in una porzione indeformata, possono essere una soluzione.

Dal punto di vista computazionale, come già detto nel caso precedente, le formule sono state presentata con la definizione continua ma nel capitolo successivo, nell'ambito del calcolo dell'incertezza verranno presentate le formulazioni discrete.

4 Valutazione dell'incertezza del volume di usura

4.1 Introduzione

La definizione dell'incertezza data dalla GUM (*"The Guide to the expression of uncertainty in measurement"*) è quella di "parametro associato al risultato di misura, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando" (40). Questo significa identificare con una procedura di valutazione, attraverso un valore numerico, l'intervallo in cui ragionevolmente può cadere il valore di ciò che si è misurato. Infatti, errori accidentali e/o sistematici possono deviare il risultato della misura rispetto al valore vero. Anche quando la correzione di un errore sistematico è stata applicata alla stima del risultato, ci sarà ancora un'incertezza in questa correzione.

La sua valutazione nel processo di misura è un aspetto chiave per assicurare la qualità del risultato di misura e permette di effettuare confronti significativi dei risultati provenienti da diverse fonti e da metodologie diverse.

Infatti, date le metodologie differenti, descritte nel capitolo precedente, per la caratterizzazione del volume di usura, uno degli scopi del lavoro è proprio quello di confrontare i risultati ottenuti con il metodo automatico e il metodo dei parametri topografici, per inferire la presenza o meno di una differenza significativa tra i due approcci o con gli approcci standard forniti da letteratura.

Definita la quantità da misurare attraverso il modello matematico, è necessario specificare quali sono le fonti di influenza che contribuiscono all'incertezza di misura per poterne quantificare gli effetti. L'esperienza di misura e la norma ne individua alcune basiche come il misurando (assunzioni, specifiche), ambiente di misura (vibrazioni, temperatura, pressione), operatori (capacità, formazione), campione (caratteristiche fisico-chimiche), macchine (strumento di misura, software), procedure (metodi diretti/indiretti, pianificazione degli esperimenti) (40).

Nel nostro caso valutiamo solo le cause rilevanti e interessanti per la ricerca condotta, ovvero quelle che non dipendono dalla procedura specifica (come operatore e sala metrologica), ovvero:

- Lo strumento di misura: CSI (*coherence scanning Interferometry*);
- Le operazioni eseguite per determinare il volume di usura: algoritmi di registrazione (ICP), estrazione della ROI e sottrazione delle superfici.

Per poi comporre i contributi in modo opportuno, come vedremo, definendo l'incertezza composta risultante.

Per quanto riguarda lo strumento, sappiamo che la domanda di tecnologie ad alta precisione ha portato alla necessità di tecniche di misura ottiche (non contatto) ad alta accuratezza come il CSI.

La norma ISO 25178-604, in questo senso, ci aiuta a standardizzare la valutazione definendo le cause di incertezza dello strumento e gli impatti in termini di caratteristiche metrologiche da considerare in modo semplificato.

Il diagramma di Ishikawa (Figura 4.1) mostra, sintetizzando le indicazioni della norma, l'influenza dei componenti dello strumento sulle caratteristiche metrologiche.

• Cause

• Effect

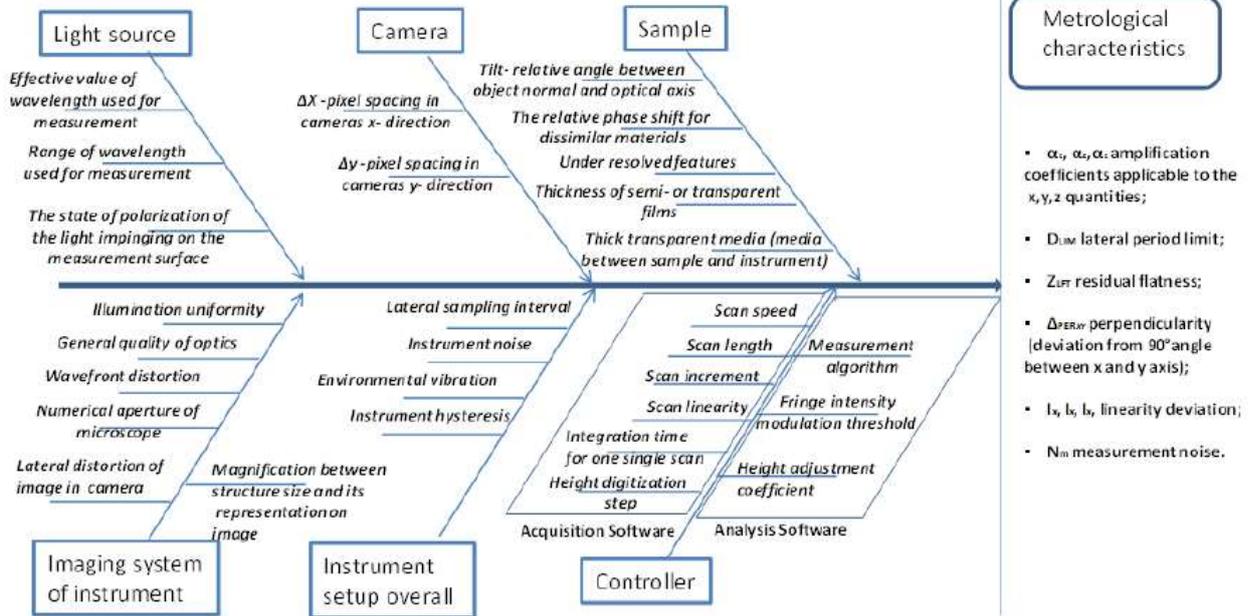


Figura 4.1: influenza delle componenti del CSI sulle caratteristiche metrologiche (66).

Ad esempio, la **sorgente luminosa** emettendo l'intervallo di lunghezze d'onda in una specifica banda spettrale influisce sui coefficienti di amplificazione dello strumento. Il formato delle **telecamere** o le quantità di pixel influiscono sul limite del periodo laterale (concettualmente la risoluzione). Le condizioni e la forma del **campione** hanno un impatto sui coefficienti di amplificazione della misurazione. L'angolo relativo tra la normale alla superficie e l'asse ottico dello strumento influisce sul coefficiente di amplificazione per le quantità x, y e z. Lo **strumento nel suo complesso** fa riferimento alle influenze del rumore, l'isteresi, vibrazioni ambientali e caratteristiche legate all'intervallo di campionamento laterale; questo oltre a definire la caratteristica metrologica di rumore di misura, impatta anche sulla deviazione dalla linearità e sul limite del periodo laterale (37,66).

Il **controller** nel CSI ha una duplice funzione: la prima è l'acquisizione delle misure, la seconda è di analizzare i dati per una loro corretta presentazione. Il software di acquisizione e analisi influenza il coefficiente di amplificazione e la deviazione di linearità, infatti queste caratteristiche sono legata al movimento lungo z oppure la velocità di scansione, lunghezza di scansione ecc. Il **sistema di imaging** influenza la maggior parte delle caratteristiche metrologiche. L'uniformità dell'illuminazione durante la misurazione sull'oggetto, la qualità dell'ottica (che include aberrazione, trasmissione, errore di allineamento), l'apertura numerica, l'ingrandimento e altre distorsioni dell'immagine impattano su quasi tutte le caratteristiche (36-37,66).

Nei successivi paragrafi verranno definite in dettaglio le varie caratteristiche metrologiche e verrà esaminato il metodo statistico per la loro taratura.

Analizzeremo inoltre, la seconda causa di interesse: gli algoritmi di registrazione, per quanto accurati nell'allineare la *point cloud* mobile con il riferimento fisso, commettono sempre un errore, il quale

si propaga nella quantificazione del volume d'usura e quindi nella sua incertezza di misura. Quantificare l'errore è molto complicato, vedremo in questo senso le semplificazioni necessarie.

Prima di procedere, però, segue una sintetica analisi dei concetti base dell'incertezza di misura, preliminari alla valutazione.

4.2 Metodi per la determinazione dell'incertezza

4.2.1 L'incertezza di categoria A e categoria B

La valutazione dei contributi all'incertezza totale di misura di un misurando viene divisa dalla Guida ISO GUM in due modalità distinte, con lo scopo di ottenere efficienza e costi limitati.

I contributi di categoria A sono quelli che vengono definiti attraverso una valutazione basata su metodi statistici. L'analisi statistica dei dati sperimentali, partendo da un campione rappresentativo, ha lo scopo di stimare i parametri della popolazione, inferendo le caratteristiche ad esempio di posizione o dispersione delle distribuzioni teoriche. Questo processo però, sovente, può essere complesso: gli stimatori, essendo variabili aleatorie, necessitano di una numerosità di dati sperimentali elevata per l'adeguatezza delle stime; inoltre, il campione deve essere rappresentativo, cioè il gruppo esaminato di dati deve contenere in sé l'informazione di tutti i fattori che incidono sulla popolazione. Questa modalità di valutazione richiede dunque competenze elevate statistiche da un lato e risulta essere onerosa (42).

I contributi di categoria B, invece, sono quelli che vengono definiti attraverso una valutazione basata su metodi non statistici, principalmente legata alla conoscenza pregressa, consolidata nella letteratura tecnico-scientifica e nella normativa, ed all'esperienza specifica nel settore in cui si svolge la misurazione (42).

La discriminazione in una delle due categorie di contributi non dipende dalla natura del fattore oppure dal fatto che questo determina un errore accidentale o sistematico, ma solo dall'approccio metodologico di valutazione adottato (42). L'obiettivo è sempre quello di definire uno scarto tipo da associare ad ogni fattore, che la normativa chiama incertezza tipo u , per svincolarsi da ogni riferimento puramente statistico della terminologia.

I fattori di incertezza da considerare sono definiti dalle procedure di misura. Quando l'esperienza pregressa consente di definire i contributi d'incertezza di questi fattori, è comunque una soluzione preferibile in quanto meno costosa, non richiede dati disponibili sufficienti ed è più robusta in quanto il contenuto di informazione è più affidabile. A priori perciò utilizzo il più possibile le informazioni di categoria B, se poi queste risultano essere critiche per l'incertezza totale, allora solo a posteriori faccio supplementi di indagine che possono portare eventualmente a misure specifiche.

L'informazione non statistica mi viene fornita frequentemente come semi-ampiezza $\pm a$ ovvero come semi-intervallo di variabilità. Questa informazione, con ipotesi semplici di distribuzione di probabilità, viene trasformata in un'informazione di varianza o scarto tipo per armonizzare la procedura e arrivare da una informazione locale di variabile indipendente ad una valutazione di incertezza composta della variabile dipendente. L'ipotesi più comune è di distribuzione uniforme ($u^2 = \frac{a^2}{3}$), che presume equiprobabilità di tutto l'intervallo, come ipotesi di ignoranza di valori

provenienti ad esempio da certificati o come nel caso della risoluzione dello strumento di misura, dove la scala limita la lettura del valore misurato.

Un'informazione aggiuntiva di valore più frequente può far optare per una distribuzione triangolare ($u^2 = \frac{a^2}{6}$), mentre se il fenomeno che produce la variabilità è un fenomeno oscillante in funzione del tempo, allora la distribuzione di probabilità avrà una forma ad U, con maggiore probabilità degli estremi ($u^2 = \frac{a^2}{2}$).

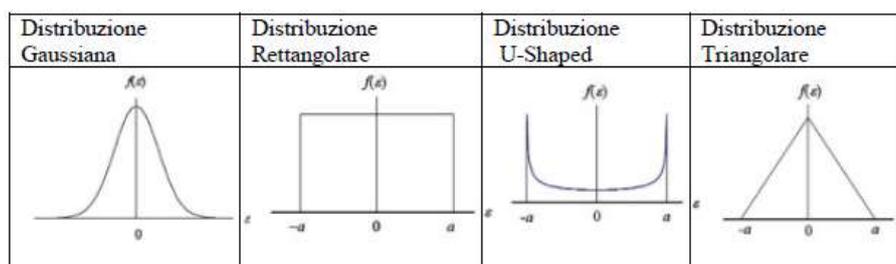


Figura 4.2. Ipotesi di distribuzioni usate per fattori valutati come contributi di categoria B.

La distribuzione gaussiana, invece, è la funzione di probabilità tipica di valutazioni statistiche di categoria A. Più specificamente, assumendo certe condizioni, la somma di n variabili casuali con media e varianza finite tende a una distribuzione normale al tendere di n all'infinito. Un fenomeno complesso, perciò, come quello di misura, risultato di n molteplici fattori, si presta ad essere descritto con questa distribuzione (42).

La procedura indicata dalla GUM può non essere sempre (facilmente) applicabile. In questi casi è opportuno utilizzare delle strategie alternative, per esempio nei casi in cui costasse troppo oppure ci volesse troppo tempo per applicare tali procedure.

Questo sottolinea quanto contenuto in norma ISO 14253-2 relativamente al metodo PUMA (“Procedure for Uncertainty Management”) (43): un metodo approssimato per la stima dell'incertezza. Ha senso investire risorse in tale valutazione fintanto che essa porta informazione utile sulla qualità della misura. Non bisogna cercare di introdurre i dati migliori che possono essere ottenuti ma si può partire da quelli disponibili o introdurre valori che ragionevolmente possono essere accettati, valutando in prima approssimazione ma con certezza di sovrastima i contributi. Se l'incertezza calcolata è superiore ad un'“incertezza target” che si ritiene ragionevole, solo in questo caso si valuta quali sono i fattori trascurabili e quali critici. Su questi ultimi converrà lavorare ulteriormente a fronte di un'ipotesi tecnica di cambiamento, valutando il miglioramento del processo.

4.2.2 Legge della propagazione dell'incertezza

Come nel caso della valutazione del volume di usura, la maggior parte delle misure di un misurando Y derivano da misurazioni indirette, ovvero a partire da n variabili indipendenti X_i di ingresso, noto a priori un modello matematico f che può essere una semplice legge fisica. Pertanto, la grandezza Y può essere espressa come funzione di diverse grandezze indipendenti $Y=f(X_1, \dots, X_n)$. Anche nel caso di una misurazione diretta della grandezza di interesse, il più semplice modello metrologico richiederebbe di considerare almeno la risoluzione dello strumento utilizzato (42).

Se le X_i sono variabili casuali, ognuna con valor medio e incertezza tipo, evidentemente anche la Y sarà una variabile casuale. Seguendo l'approssimazione di linearizzazione della GUM il valore medio

di Y (m_y) potrà essere ottenuto dai valori medi delle singole grandezze indipendenti inserite nel modello di misura.

Più complesso è il calcolo dell'incertezza tipo della variabile dipendente $u(y)$. Una prima assunzione è quella di un modello linearizzato. Ciò implica che, a fronte di piccole variazioni delle variabili indipendenti x_j rispetto ai valori medi rispettivi, si può quantificare la corrispondente variazione della variabile dipendente con uno sviluppo di Taylor arrestato al primo ordine.

$$\partial y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)_{\bar{x}_1} \partial x_1 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)_{\bar{x}_n} \partial x_n \quad (4.1)$$

Premesso che la funzione sia derivabile nel punto, le tangenti locali della funzione f rispetto alle variabili X_j calcolati in corrispondenza dei valori medi \bar{x}_j sono dette coefficienti di sensibilità c_j in quanto definiscono l'impatto del contributo all'incertezza del singolo fattore sulla variabile di interesse.

$$c_j = \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_{\bar{x}_j} \quad (4.1.1)$$

La via numerica al posto di quella analitica è preferibile se l'approssimazione dello sviluppo di Taylor al primo ordine non è sufficiente oppure nel caso in cui sono identificate grandezze di ingresso ma non è nota la relazione funzionale che le lega al misurando: i coefficienti di sensibilità possono essere misurati in modo approssimato, invece che calcolati analiticamente facendo variare in modo controllato una grandezza di ingresso per volta, a mantenendo fisse le altre (42).

Se il modello è linearizzabile, la varianza della quantità dipendente $u^2(y)$ può essere calcolata, data una serie di q misurazioni ∂y_i espresse in forma vettoriale, secondo l'equazione matriciale:

$$s^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^q (\partial y_i)^2}{q-1} = \frac{\{\partial y_i\}^T \{\partial y_i\}}{q-1} = \{c_j\}^T \frac{[\partial x_{ij}]^T [\partial x_{ij}]}{q-1} \{c_j\} \quad (4.1.2)$$

L'espressione può essere resa ulteriormente più compatta introducendo la matrice di varianza-covarianza delle quantità indipendenti $V_{CV} \in \mathbb{R}^{n,n}$ con $V_{CV} = \frac{[\partial x_{ij}]^T [\partial x_{ij}]}{q-1}$

$$u^2(y) = \{c_j\}^T V_{CV} \{c_j\} = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n c_a c_b V_{CV_{a,b}} \quad (4.1.3)$$

Con $V_{CV_{ab}} = Cov(x_a, x_b)$.

Quest'equazione rappresenta la legge di propagazione dell'incertezza che è un caso particolare della legge di propagazione della varianza.

Un'ulteriore semplificazione può essere assunta, coerente con la pratica di misura, ovvero la non correlazione tra le variabili indipendenti. La matrice V_{CV} diventa dunque una matrice diagonale e l'equazione può essere riscritta come:

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2 u^2(x_j) = \sum_{j=1}^n u_j^2(y) \quad (4.1.4)$$

Dove $u^2(x_j)$ è il fattore di influenza j-esimo valutato statisticamente o meno come contributo di categoria A o B.

4.2.3 Calcolo dell'incertezza estesa

L'incertezza tipo non rappresenta un intervallo ragionevolmente attribuibile al misurando, in quanto l'intervallo $\pm \sigma$ nel caso di una distribuzione normale, contiene poco meno del 70% dei valori e non fornisce una copertura ragionevole. Perciò quella di incertezza tipo è un'informazione tecnicamente molto utile, ma non è utile per trasferire un'informazione concreta di variabilità. Questo spiega la necessità di definire l'incertezza estesa U , che nel settore metrologico si declina nella necessità di fornire l'informazione convenzionalmente a 2σ , ovvero un livello di fiducia del circa 95%. Ma il rischio di prima specie α e conseguente β , deve essere commisurato alle conseguenze della misura fornita e alla gravità di fare un'affermazione non vera. Quindi mentre il 95% è legato a una condizione di ignoranza in quanto convenzionale, nulla esclude di modificare a priori quel valore dopo opportune valutazioni (non a caso nell'ambito della Qualità industriale il valore è del 99,7%).

Assumendo, come nella maggior parte dei casi pratici, che la grandezza Y si distribuisce normalmente (o con una distribuzione di Student per convenienza) per il Teorema del Limite Centrale $Y \sim N(\mathbb{E}[Y], \text{Var}[Y])$, l'espressione dell'incertezza estesa potrà essere scritta come:

$$U = k(P, \nu)u \quad (4.2)$$

Dove K viene definito dalla norma come fattore di copertura $k = t_{P, \nu}^{-1}$, ovvero calcolato come il quantile di una t-Student con ν gradi di libertà e un certo intervallo di confidenza P .

I gradi di libertà degli n fattori indipendenti ν_j impattano sui gradi di libertà ν della grandezza dipendente Y . La valutazione può essere fatta attraverso la formula di Welch-Satterthwaite, che mette in relazione i gradi di libertà ν della variabile dipendente Y , con la varianza della variabile dipendente $u^2(y)$, con i contributi di varianza $u_j^2(y)$ di ciascuna variabile indipendente X_j e i singoli gradi di libertà ν_j :

$$\nu = \frac{u^4(y)}{\sum_{j=1}^n \frac{u_j^4(y)}{\nu_j}} \quad (4.2.1)$$

La dichiarazione di incertezza su un risultato è data nella forma:

$$y = m_y \pm U \quad (4.2.2)$$

I contributi che influenzano la mia misurazione sono tutti contenuti nell'incertezza e sono quello che rimane dagli errori dopo che si è cercato di eliminarli il più possibile. Gli errori possono essere globalmente divisi in errori sistematici, accidentali e incidenti di misura.

Gli errori sistematici sono quelli in cui è chiaramente identificabile una relazione con la causa che li genera, pertanto è possibile una eliminazione deterministica dell'errore attraverso correzione, compensazione oppure eliminazione della causa ma un residuo di errore sistematico è sempre presente come contributo all'incertezza. Tra gli errori accidentali, invece, troviamo gli effetti di tutti gli altri fattori di influenza sulla misura e hanno un carattere aleatorio; nessuna relazione causa-effetto può essere stabilita. La casualità e la molteplicità dei fattori che determinano questi contributi molto simili, permettono una gestione statistica di tali errori mediante distribuzioni normali (42).

Gli incidenti di misura invece, sono casuali ma rari e di entità molto superiore rispetto la nuvola degli errori accidentali, quindi vanno eliminati attraverso principi di esclusione.

4.3 Procedura di taratura di un interferometro a luce bianca

L'incertezza di misura di uno strumento di misura ottico è influenzata da diversi fattori, come ambientali, rumore meccanico ed elettrico, aberrazioni ottiche e algoritmi matematici. Per valutare il contributo di ogni singolo fattore sarebbe richiesto tempo e spesso non è necessario. La gestione deve essere mirata e limitata alla determinazione di quelle caratteristiche che sono realmente necessarie per lo strumento e complesso di misura evitando una trattazione generalizzata completa con impiego di risorse umane, economiche e di tempo. Si possono tener conto i fattori di influenza utilizzando le caratteristiche metrologiche (MC) introdotte nello standard ISO 25178-600 (appartenente al framework del Geometrical Product Specifications (GPS)) per gli strumenti di misura ottici della superficie topografica. La norma definisce le caratteristiche metrologiche come "caratteristiche dell'attrezzatura di misurazione, che possono influenzare il risultato di misurazione, potrebbero richiedere una taratura e avere un immediato contributo all'incertezza di misura". Sono state inserite nelle specifiche della norma sette MC: rumore di misurazione, deviazione di planarità, coefficiente di amplificazione, deviazione di linearità, deviazione della mappatura x-y, risoluzione spaziale topografica, fedeltà topografica (31-32).

Metrological characteristic	Symbol	Main potential error direction	Error type
Amplification coefficient	$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z,$	x, y, z	Systematic
Linearity deviation	$l_x, l_y, l_z,$	x, y, z	Systematic
Flatness deviation	Z_{FLT}	z	Reproducibility and systematic error due to system reference
Measurement noise	N_M	z	Repeatability
Topographic spatial resolution	W_R	z	Resolution
x-y mapping deviation	$\Delta_x(x,y),$ $\Delta_y(x,y)$	x, y	Systematic
Topography fidelity	T_{FI}	x, y, z	Systematic

Figura 4.3 lista delle caratteristiche metrologiche per il CSI

Teoricamente dovremmo avere degli artefatti tarati e caratterizzare il sistema di misura, nel nostro caso il microscopio. Nel lavoro sperimentale gli artefatti tarati non sono stati utilizzati, quindi invece di eseguire una stima di tipo A, ovvero stimare i contributi in modo statistico, è stata eseguita una stima di tipo B utilizzando le indicazioni fornite dalla letteratura di riferimento.

Segue una descrizione delle caratteristiche metrologiche e una indicazione teorica di come le guide e le norme (National Physical Laboratory-NPL-Good Practice Guide No. 127) vorrebbero la quantificazione dei contributi per via statistica (Claudiu L. Giusca, Richard K. Leach).

4.3.1 Rumore di misurazione N_M

Il rumore di misurazione N_M è definito dalla norma ISO 25178-600 come ‘il rumore aggiunto al segnale di uscita che si verifica durante l’uso normale dello strumento’ (37). Il rumore di misurazione (accidentale, legato alla ripetibilità della misura) è un fenomeno dinamico, che è influenzato dal movimento dell’unità motrice lungo x e y, nonché la rumorosità interna allo strumento e i disturbi ambientali, ed impatta sulla misura lungo l’asse z durante la scansione (32).

Esempi di fonti di rumore possono essere: instabilità nell’elettronica dello strumento, rumore ambientale legato alle vibrazioni del pavimento, ventilazioni (derive o turbolenze), suono, fluttuazioni della temperatura nel lungo o breve periodo (che tipicamente introducono derive nelle misurazioni che devono essere compensate automaticamente da algoritmi, soprattutto nel caso in cui la sala metrologica non è controllata termicamente), disturbi elettromagnetici esterni e vibrazioni generate dai componenti dello strumento interessati dal moto durante il funzionamento del microscopio (32).

La norma ISO 25178-600 definisce la procedura per l’individuazione del contributo all’incertezza di questo fattore.

La determinazione di N_M si ottiene attraverso la misurazione topografica della superficie areale di un artefatto piano, il cui parametro topografico S_z non supera 30 nm. Per isolare il rumore di misura vengono utilizzate da letteratura due tecniche, che nel caso siano applicabili, evitano l’utilizzo di campioni tarati, che invece diventano necessari qualora ad esempio non ci sia abbastanza tempo per misurazioni multiple (35).

Entrambe le tecniche descrivono N_M in termini di altezza quadratica media della superficie S_q .

La prima tecnica utilizza la sottrazione di due topografie misurate; richiede due misure ripetute nella stessa posizione sullo stesso campione in successione. Data la risultante topografia per sottrazione, e stimando il parametro di dispersione (RMS) S_q della medesima, il rumore di misura $S_{q_{noise}}$ può essere ottenuto dalla seguente equazione:

$$S_{q_{noise}} = \frac{S_q}{\sqrt{2}} \quad (4.3)$$

La seconda tecnica, invece, media molte misure topografiche in modo che gli effetti del rumore accidentali siano ridotti secondo la radice quadrata del numero delle misurazioni mediate, come mostra la seguente equazione:

$$S_{q_{noise}} = \sqrt{\frac{S_q^2 - S_{q_{mean}}^2}{1 - \frac{1}{n}}} \quad (4.3.1)$$

Dove S_q è l’altezza quadratica media della topografia superficiale non mediata, mentre $S_{q_{mean}}$ è il parametro di dispersione delle superfici topografiche mediate, ed n è il numero di misure mediate.

La Figura 4.4 mostra esempi di profili estratti nel caso non mediato e nel caso di due superfici mediate.

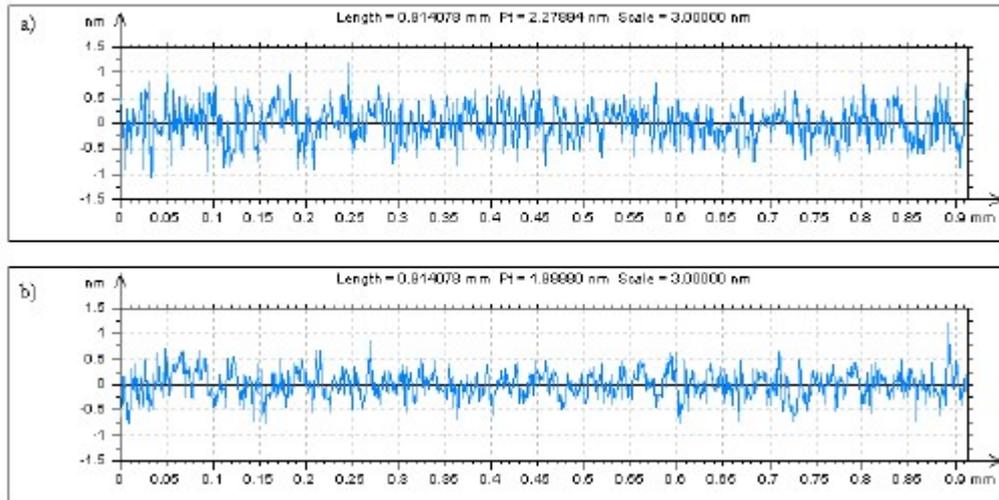


Figura 4.4 Esempio di profili estratti a) nessuna media b) media di due profili

Dunque, il contributo all'incertezza del rumore di misura si propaga con una distribuzione normale con valore atteso nullo e varianza pari alla misura di rumore al quadrato e può essere calcolato di conseguenza (35):

$$u_{noise} = N_M = S_{q_{noise}} \quad (4.3.2)$$

4.3.2 Deviazione di planarità Z_{FLT}

La norma ISO 25178-604 definisce il riferimento areale come “componente dello strumento che genera una superficie di riferimento rispetto alla quale viene misurata la topografia superficiale” (36,37).

La deviazione di planarità Z_{FLT} descrive la qualità del riferimento dello strumento come deviazione dalla planarità ideale, il cui risultato impatta sugli errori di misurazione lungo l'asse z. Le aberrazioni ottiche, legate a sistemi non ideali di lenti e specchi dell'interferometro o al loro montaggio scorretto, sono una delle principali cause di questo errore (che può avere un carattere di sistematicità) (31).

Le procedure per il test di planarità richiedono l'utilizzo di un artefatto standard piano con un'altezza massima picco-valle (S_z) inferiore ai 30 nm. Il parametro che viene utilizzato per valutare la qualità areale del riferimento è la massima altezza della superficie S_z (35).

Per eliminare l'influenza della topografia del piano ottico e il rumore di misura da Z_{FLT} , vengono mediate 10 misurazioni della topografia eseguite in differenti posizioni attraverso lo spostamento del piano in modo orizzontale. Anche se in pratica meno di dieci misurazioni potrebbero essere richieste nel caso in cui il parametro topografico mediato S_z convergesse. Le repliche, secondo le guide pratiche, devono essere ripetute finché il valore S_z non cambia più del 5% (31).

Con lo scopo di eliminare le imperfezioni come particelle di sporco, graffiature o altre altezze locali sul piano ottico che impattano su S_z , viene effettuato un processo di rimozione degli outlier come mostrato in Figura 4.5.

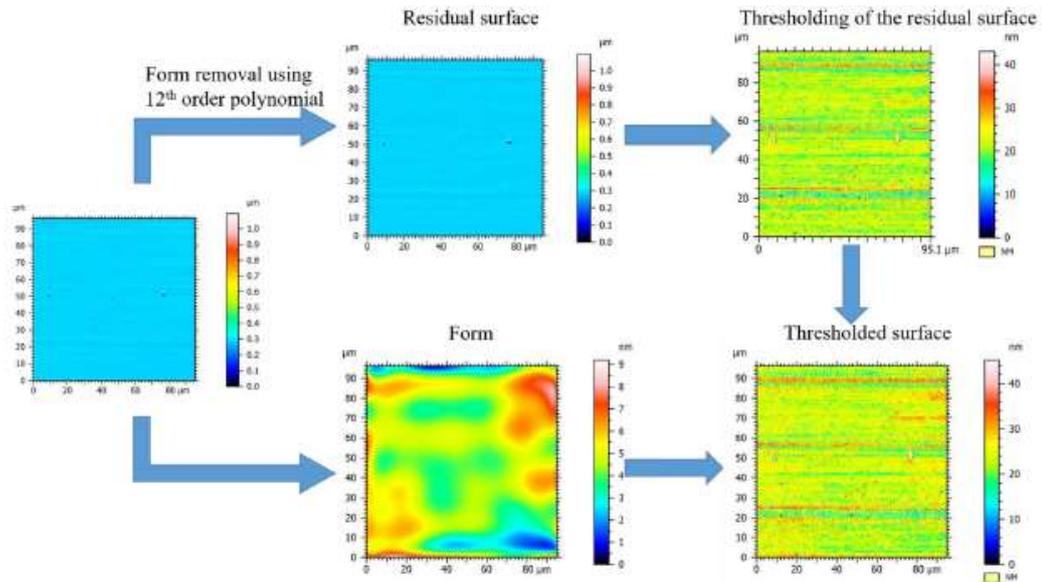


Figura 4.5 esempio di flusso di lavoro per la rimozione degli outliers

Ad esempio, si rimuove la forma della superficie dalla topografia usando una polinomiale di dodicesimo ordine. Sulla superficie residua si esegue un'operazione di *thresholding* (sogliatura) che elimina i picchi e le valli distanti più di tre volte lo scarto tipo (S_q), calcolato sulla superficie residua. Infine, la topografia della forma e la superficie residua rielaborata vengono risommate per ottenere la superficie finale senza *outliers*.

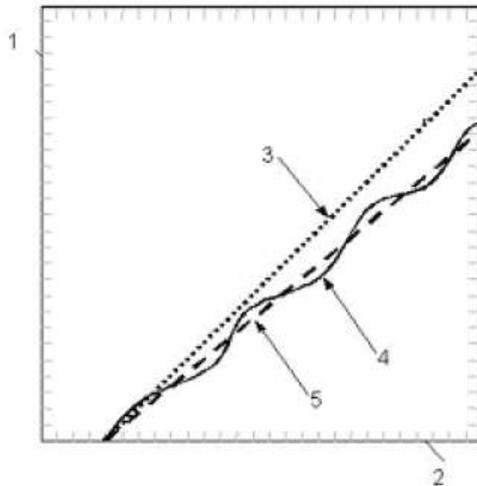
Il contributo di incertezza della deviazione di planarità è calcolato ipotizzando una distribuzione rettangolare di semi-ampiezza $\frac{z_{FLT}}{2}$ ed è calcolato usando l'equazione seguente:

$$u_{flatness} = \frac{z_{FLT}}{\sqrt{12}} \quad (4.4)$$

Sia il rumore di misura che la deviazione di planarità causano un errore di misurazione lungo l'asse z ; proprio per questo motivo il loro contributo all'incertezza di misura viene spesso riportato insieme, combinandolo attraverso l'equazione di propagazione dell'incertezza $u_{NF} = \sqrt{u_{noise}^2 + u_{flatness}^2}$.

Ci sono anche alcuni metodi alternativi di valutazione congiunta delle due caratteristiche metrologiche proposti in letteratura (Giusca e altri), che sono prova del fatto che non ci sia una netta separazione dei due contributi.

4.3.3 Coefficiente di amplificazione, deviazione di linearità e perpendicolarità



Il coefficiente di amplificazione è definito come la pendenza della curva di regressione lineare (5) ottenuta dalla curva di risposta (4). La curva di risposta è la rappresentazione grafica della funzione che descrive la relazione tra il valore reale e quello misurato (una quantità effettiva in x (rispettivamente y o z) corrisponde a una quantità misurata x_M). La Figura mostra che la deviazione di linearità l corrisponde alla deviazione massima della curva di risposta dello strumento (4) dalla curva lineare (5) con pendenza α .

I coefficienti di amplificazione sono applicabili alle quantità x , y e z . La risposta ideale è una linea retta

con una pendenza uguale a 1, il che significa che i valori di misurando sono uguali ai valori delle grandezze in ingresso; ciò è abbastanza tipico all'atto pratico, come nel caso dello strumento usato per il lavoro sperimentale, ma nel caso non lo fosse, la procedura di calibrazione richiederebbe un aggiustamento della curva di risposta col fine di eliminare il sistematico α dalle misurazioni lungo la scala. L'errore residuo è la linearità, che rappresenta scostamenti casuali; Con una valutazione di tipo statistico si può derivare il contributo di incertezza della caratteristica metrologica della linearità: si ipotizza che il massimo di questi scostamenti è l'ampiezza di una distribuzione uniforme, da cui facilmente si può ricavare lo scarto tipo (31, 35-37).

4.3.3.1 Asse z

La taratura del coefficiente di amplificazione z (α_z), errore di linearità (l_z) e perpendicolarità consiste in una serie di misure di un set di n manufatti standard a gradini con altezze diverse, i quali dovrebbero coprire l'intero range di lavoro lungo z , o almeno il range di interesse pratico (35). Seguendo questa procedura, gli errori di linearità e del coefficiente di amplificazione possono essere estratti dai risultati di misura dei diversi campioni, fittando una retta sui dati e forzando il passaggio sull'origine. Il coefficiente di amplificazione può essere calcolato utilizzando l'equazione seguente

$$\alpha_z = \frac{\sum_i^n C_i I_i}{\sum_i^n C_i^2} \quad (4.5)$$

Dove n rappresenta il numero di campioni diversi usati, C_i è il valore di riferimento certificato, mentre I_i è il valore misurato. La procedura di misurazione della topografia dei campioni non è standardizzata, ma un esempio di procedura richiede l'utilizzo di quattro differenti campioni calibrati. Ognuno di questi viene misurato in 5 posizioni della scala di funzionamento dello strumento (10 %, 30 %, 50 %, 70 % e 90 %), che permette di fornire un'informazione di riproducibilità delle misure entro il range di funzionamento dello strumento. Ad ognuna delle 5 posizioni, i campioni calibrati sono misurati 5 volte, per avere un'informazione di ripetibilità delle misure. Dalla procedura si possono calcolare: l'errore di misura l_z come differenza del valore misurato (esempio al 50%) e quello certificato (si distribuisce secondo una distribuzione uniforme); la ripetibilità δ_{repeat} viene presa come il massimo scarto tipo del valore medio calcolato ad ognuna delle 5 posizioni del range dello strumento; la riproducibilità δ_{reprod} è calcolata come deviazione standard dei valori medi degli artefatti misurati in ciascuna delle cinque posizioni. Per calcolare l'incertezza legata al contributo di linearità

e amplificazione come somma dei quadrati dei vari fattori, bisogna aggiungere il contributo di tracciabilità u_t che fa riferimento all'incertezza della taratura dei campioni standard. Il contributo di ripetibilità e riproducibilità (u_{repeat} e u_{reprod}) viene propagato sotto forma di distribuzione normale che ha valore atteso nullo e una varianza uguale al quadrato del valore della ripetibilità o riproducibilità (δ_{repeat} , δ_{reprod}).

In pratica, il coefficiente di amplificazione calcolato αz (e poi rispettivamente αx , αy) è utilizzato per la regolazione dello strumento o lo strumento viene utilizzato senza correzione. Ciò implica che la valutazione di linearità e amplificazione residua debbano essere ripetuti dopo l'aggiustamento del sistematico e il contributo dei fattori all'incertezza di misura lungo l'asse z (u_z) può essere determinato con la seguente equazione, assumendo essere distribuito secondo una normale:

$$u_z = \max \left\{ \sqrt{\frac{l_{z_i}^2}{3} + u_{reprod_i}^2 + u_{repeat_i}^2 + u_{t_i}^2} \right\} \quad (4.5.1)$$

Dove i si riferisce in questo caso ai 4 differenti campioni calibrati (35-37,31).

4.3.3.2 Asse x e y

In modo simile alla taratura lungo z, ma con un campione standard diverso può essere fatta la taratura delle misure lungo x e y. I coefficienti di amplificazione in x e y (αx e αy), gli errori di linearità (l_x e l_y) e la perpendicolarità (Δ_{PER}) possono essere misurati utilizzando un campione standard reticolare del tipo ACG (vedi Figura 4.6).

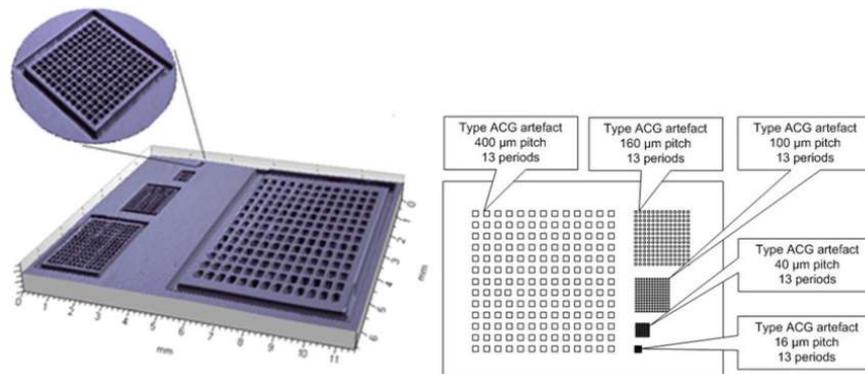


Figura 4.6 esempio di manufatti tarati del tipo ACG con stessi periodi ma passi diversi

Le prime due caratteristiche metrologiche possono essere misurate utilizzando i centri di gravità dei quadrati dei reticoli. La taratura degli assi laterali viene eseguita dalla determinazione delle deviazioni di mappatura, $\Delta x(x, y)$ e $\Delta y(x, y)$ che caratterizza la distorsione laterale nella topografia misurata, da cui si ricavano α e l . Mentre, la deviazione di perpendicolarità dell'asse x e y può essere determinata definendo l'angolo tra due righe ortogonali dei quadrati del reticolo, la cui orientazione è determinata attraverso il fitting di una retta che passa attraverso il centro di gravità dei quadrati corrispondenti; sebbene quest'ultima caratteristica metrologica sia stata rimossa dalla lista dei fattori di incertezza di misura legati allo strumento nell'ultima versione della norma ISO 25178-600.

L'incertezza di misura lungo l'asse x e y legata alla linearità e amplificazione è calcolata in modo identico a quello relativo all'asse z (35).

4.3.4 Risoluzione W_R

Per il CSI la risoluzione lungo l'asse z e lungo l'asse x e y sono determinate separatamente. Si può assumere che il rumore di misura includa la risoluzione lungo l'asse z, mentre il limite laterale del periodo può essere usato per stimare la risoluzione del CSI lungo l'asse x e y. La risoluzione laterale per un microscopio 2D può essere definita come la più piccola separazione laterale tra due punti che possono essere distinti. Per un microscopio topografico 3D come il CSI, poiché è necessario separare due punti su un profilo corrispondenti a diversi livelli di altezza e la distanza tra due *point clouds* adiacenti influenza la differenza di altezze, la norma ISO 25178 introduce la definizione e la valutazione del limite del periodo laterale ("periodo spaziale di un profilo sinusoidale in cui la risposta ottica scende al 50%") (37). Uno standard fisico di tipo ASG (a stella) viene utilizzato per la valutazione di questa caratteristica metrologica, ma non verrà definito nello specifico il procedimento.

La dimensione dei pixel (*pixelsize*) della telecamera CCD deve essere inferiore alla risoluzione, altrimenti la risoluzione è limitata dalla telecamera. Per alcuni CSI, come nel caso del lavoro sperimentale, la risoluzione della telecamera corrisponde alla risoluzione ottica; questo accade fino a circa 10X di ingrandimento.

Il contributo della risoluzione laterale all'incertezza di misura (u_{W_R}), viene propagato in forma di una distribuzione rettangolare che ha uno scarto tipo uguale a:

$$u_{W_R} = \frac{W_R}{\sqrt{3}} \quad (4.6)$$

dove W_R è il limite del periodo laterale (37).

La Figura 4.7 sintetizza il contributo all'incertezza di misura delle caratteristiche metrologiche appena esaminate; ricordo che α e Δ non sono presenti poiché contribuiscono a definire l e il loro contributo è lì incluso.

Metrological characteristic	Distribution of the MC	Contribution to uncertainty
N_M	Normal	$u_{N_M} = N_M$
Z_{FLT}	Uniform	$u_{Z_{FLT}} = \frac{Z_{FLT}}{\sqrt{12}}$
$l_{x,y,z}$	Normal	$u_{x,y,z} = \sqrt{\frac{l_{x,y,z}^2}{3} + u_{reproducibility_i}^2 + u_{repeatability_i}^2 + u_{t_i}^2}$
W_R	Uniform	$u_{W_R} = \frac{W_R}{\sqrt{3}}$
T_{FI}	Normal	$u_{T_{FI}} = T_{FI}$

Figura 4.7 sintesi dei contributi all'incertezza delle singole caratteristiche metrologiche

Nessuna disamina è stata introdotta relativamente alla *Topography fidelity* T_{FI} , in quanto la sua valutazione non è ancora riportata dalla letteratura, perciò, non essendoci modo per calcolarla, si può tralasciare.

Il contributo all'incertezza delle caratteristiche metrologiche può essere combinato per ricavare l'incertezza di misura standard dei tre assi dello strumento, come mostrato nelle seguenti equazioni:

$$u(z) = \sqrt{u_{NM}^2 + u_{ZFLT}^2 + u_z^2 + u_{TFI}^2} \quad (4.7.1)$$

$$u(x) = \sqrt{u_{WR}^2 + u_x^2} \quad (4.7.2)$$

$$u(y) = \sqrt{u_{WR}^2 + u_y^2} \quad (4.7.3)$$

4.4 Incertezza legata alla procedura di calcolo dell'usura (registrazione e sottrazione)

Per la caratterizzazione del volume di usura, sia per il metodo automatico che dei parametri topografici, non ci limitiamo alla rilevazione diretta delle misure mediante il CSI, il quale si porta dietro i contributi di incertezza legati alle sue caratteristiche metrologiche, ma in aggiunta viene eseguita un'operazione di registrazione e sottrazione delle superfici topografiche misurate. Infatti, posta la superficie pre-usura come riferimento fisso, la superficie post-usura deve essere sottoposta a registrazione per riportarci a un sistema di coordinate omogeneo utilizzando l'algoritmo ICP. Questo vuol dire trovare una matrice di roto-traslazione, ovvero applicare una trasformazione lineare alla *point cloud* similmente ad una regressione lineare. Anche l'algoritmo di registrazione perciò, si porterà dietro i suoi contributi di incertezza che non possono essere trascurati.

Per semplicità di trattazione analitica immaginiamo di avere solo due valori misurati Ω (prima dell'usura) e Ψ (post test tribologico), i quali si portano dietro entrambi le stesse componenti di incertezza descritti sino ad ora ($u_\Omega = u_\Psi$). La trasformazione lineare da applicare a Ψ , per avere lo stesso sistema di riferimento, sarà del tipo $\Theta = a\Psi + b$. Ai fini dell'incertezza, dunque, bisogna propagare la roto-traslazione; ma l'applicazione degli algoritmi di *computer vision* non ci permette di conoscere in output lo *standard error* dei parametri della trasformazione, rendendo impossibile la propagazione dell'incertezza. Una semplificazione, per superare il limite, consiste nel considerare la trasformazione lineare come deterministica e considerare l'errore casuale residuo della trasformazione (RMSE) come contributo oltre all'apporto metrologico.

$$u_\Theta = u_\Psi + RMSE \quad (4.8)$$

con $RMSE = s(\Omega - \Theta)$, che è l'unico parametro fornito da Matlab o CloudCompare (lo scarto tipo dei residui).

Il passaggio successivo è caratterizzare il volume d'usura, calcolato come differenza delle due misure lungo z , con un modello semplificato del tipo $K = \Theta - \Omega$.

In termini di propagazione d'incertezza, considerando Θ e Ω indipendenti, l'incertezza delle differenze è sempre una somma quadratica delle varianze, ovvero l'incertezza relativa è più alta: quindi nel computo totale i contributi legati alle misure lungo z devono essere moltiplicati per due $u_k = 2u_\Omega + RMSE$.

Possiamo dunque riscrivere le equazioni dell'incertezza standard sui tre assi nella caratterizzazione del volume d'usura:

$$u^2(x) = \sqrt{(u_{WR}^2 + u_x^2) + u_{x,Reg}^2} \quad (4.9)$$

$$u^2(y) = \sqrt{(u_{WR}^2 + u_y^2) + u_{y,Reg}^2} \quad (4.9.1)$$

$$u^2(z) = \sqrt{2(u_{NM}^2 + u_{ZFLT}^2 + u_z^2) + u_{z,Reg}^2} \quad (4.9.2)$$

Con $u_{z,x,y,Reg}^2$ che rappresenta l'errore di registrazione quadratico sui tre assi.

4.5 Valutazione dell'incertezza del volume di usura

Dopo aver definito l'incertezza delle misure degli strumenti topografici in senso lato, legate alle caratteristiche metrologiche del CSI, e degli algoritmi utilizzati per la definizione del volume di usura, il passo successivo è utilizzare il framework della letteratura più recente (Maculotti e altri) per valutare l'incertezza del volume d'usura, caratterizzato secondo i metodi topografici analizzati nel capitolo precedente (67). Lo scopo è quello di poter confrontare le performance della quantificazione del volume d'usura tra i due metodi topografici utilizzati oppure tra i metodi topografici e quelli standard (sviluppati da Colbert e altri) (41, 67).

4.5.1 Metodo automatico basato sulla topografia superficiale

Il modello matematico è il seguente:

$$V_{aut} = d_y \sum_{j=2}^{N-1} S_j + \frac{d_y}{2} (S_1 + S_N) \quad (3.12)$$

Ed evidenzia le variabili indipendenti X, le quali sono ipotizzate non correlate.

La Figura 4.8 mostra i fattori di influenza, le quantità misurate e i contributi di incertezza che si portano dietro.

Influence factor	Measured quantity	Standard uncertainty
S_j	d_x	$u(d)$
	z_{ij}	$u(z)$
d_y	d_y	$u(d)$

Figura 4.8 fattori di influenza che contribuiscono all'incertezza nel modello automatico

La varianza dovuta alla dimensione dei pixel, d , secondo Giusca e Leach può essere assunta associata a una distribuzione triangolare con una semi-ampiezza d , quindi $u^2(d) = \frac{d^2}{6}$.

Mentre la propagazione dell'incertezza deve essere invocata nel caso della superficie S_j , in accordo con la definizione $S_j = d_x \sum_i |z_i|$.

Di seguito vengono mostrate le variabili, i coefficienti di sensitività per ciascuna variabile, la matrice di varianza-covarianza e il calcolo dell'incertezza del volume con il metodo automatico:

$$X = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_N \\ S_j \\ d_y \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$c = \begin{bmatrix} \frac{d_y}{2} \\ \frac{d_y}{2} \\ d_y \\ \left[\sum_{j=2}^{N-1} S_j + \frac{1}{2}(S_1 + S_N) \right] \end{bmatrix} \quad (4.10.1)$$

$$VCV = \begin{bmatrix} u^2(S_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u^2(S_N) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u^2(S_j) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u^2(d) \end{bmatrix} \quad (4.10.2)$$

$$u^2(V_{aut}) = \frac{d_y^2}{4} (u^2(S_1) + u^2(S_N)) + d_y^2 \sum_{j=2}^{N-1} u^2(S_j) + \left(\sum_{j=2}^{N-1} S_j + \frac{S_1 + S_N}{2} \right)^2 u^2(d) \quad (4.10.3)$$

Per confrontare questo metodo con quello standard, bisogna derivare l'incertezza del volume medio. Questo può essere fatto sfruttando la varianza della media campionaria, considerando che il campione include i profili estratti (N):

$$u^2(\overline{V}_{aut}) = \frac{u^2(V_{aut})}{N} \quad (4.10.4)$$

4.5.2 Metodo dei parametri volumetrici

La valutazione richiede di passare dalla definizione nel continuo dei parametri a quella discreta:

$$V_m(m_r) = K \int_{0\%}^{m_r} (S_{mc}(p) - S_{mc}(m_r)) dp \approx K \sum_{j=1}^B \Delta z_j m_{rj} \quad (4.11)$$

$$V_v(m_r) = K \int_{m_r}^{100\%} (S_{mc}(m_r) - S_{mc}(p)) dp \approx K \left(100\% (z_{max} - h) - \sum_{j=B+1}^{N_{bin}} \Delta z_j m_{rj} \right) \quad (4.11.1)$$

$$K = n_x n_y d^2 \quad (4.11.2)$$

dove $h = S_{mc}(m_r)$, n_x, n_y sono il numero di pixel misurati lungo l'asse x e y, d è la dimensione dei pixel nell'ipotesi che $d_x = d_y = d$. Per lavorare nel discreto, si approssima la curva di rapporto materiale in un istogramma. Il *binning* consiste nella suddivisione delle ordinate in N_{bin} classi, dove il j-esimo bin è ampio $\Delta z_j = z_i - z_j$ ed è associato ad una certa percentuale di rapporto materiale m_{rj} . Questa percentuale, sotto l'assunzione che l'istogramma è costruito esattamente, la assumiamo come non misurata e quindi che non contribuisce all'incertezza di misura. La quota h appartiene al B-iesimo bin.

I fattori di influenza in termini di incertezza sono l'altezza e l'ampiezza del pixel come in figura 4.9.

Influence factor	Measured quantity	Standard uncertainty
Δz_j	$z_i - z_j$	$\sqrt{2} \cdot u(z)$
h	h	$u(z)$
K	d	$u(d)$

Figura 4.9 fattori di influenza che contribuiscono all'incertezza nel modello dei parametri topografici

Dalla variabile indipendente d , possiamo calcolarci l'incertezza della variabile dipendente K come segue (67):

$$X = [d] \quad (4.12)$$

$$c = [2dn_x n_y] \quad (4.12.1)$$

$$VCV = [u^2(d)] \quad (4.12.2)$$

$$u^2(K) = 4(n_x n_y)^2 d^2 u^2(d) = 4K n_x n_y u^2(d) \quad (4.12.3)$$

Applicando la legge della propagazione della varianza, si può calcolare la varianza del volume materiale V_m , ovvero il $V_{galling}$:

$$X = \begin{bmatrix} K \\ \Delta z_j \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$c = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^B \Delta z_j m_{rj} \\ K m_{rj} \end{bmatrix} \quad (4.13.1)$$

$$VCV = \begin{bmatrix} u^2(K) & 0 \\ 0 & 2u^2(z) \end{bmatrix} \quad (4.13.2)$$

$$u^2(V_m(m_r)) = \left(\sum_{j=1}^B \Delta z_j m_{rj} \right)^2 u^2(K) + 2K^2 \sum_{j=1}^B m_{rj}^2 u^2(z) \quad (4.13.3)$$

La stessa cosa si può ripetere per il volume vuoto V_v , ovvero il volume di usura V_{wear} :

$$X = \begin{bmatrix} K \\ z_{max} - h \\ \Delta z_j \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$c = \begin{bmatrix} (z_{max} - h) - \sum_{j=B+1}^{Nbin} \Delta z_j m_{rj} \\ K \\ -K m_{rj} \end{bmatrix} \quad (4.14.1)$$

$$VCV = \begin{bmatrix} u^2(K) & 0 & 0 \\ 0 & 2u^2(z) & 0 \\ 0 & 0 & 2u^2(z) \end{bmatrix} \quad (4.14.2)$$

$$u^2(V_v(m_r)) = \left((z_{max} - h) - \sum_{j=B+1}^{Nbin} \Delta z_j m_{rj} \right)^2 u^2(K) + 2K^2 \left(1 + \sum_{j=B+1}^{Nbin} m_{rj}^2 \right) u^2(z) \quad (4.14.3)$$

Infine, si può calcolare la somma dei due volumi V_{VP} , che corrisponde alla grandezza di interesse, ovvero al danno totale V_{damage} . Combinando il due risultati, si avrà:

$$u^2(V_{VP}) = u^2(V_m(m_r)) + u^2(V_v(m_r)) \quad (4.15)$$

$$u^2(V_{VP}) = \left[\left(\sum_{j=1}^B \Delta z_j m_{rj} \right)^2 + \left((z_{max} - h) - \sum_{j=B+1}^{Nbin} \Delta z_j m_{rj} \right)^2 \right] u^2(K) + 2K^2 \left[1 + \sum_{j=1}^{Nbin} m_{rj}^2 \right] u^2(z) \quad (4.15.1)$$

$$u^2(V_{VP}) = \left[\left(\frac{V_m(m_r)}{K} \right)^2 + \left(\frac{V_v(m_r)}{K} \right)^2 \right] u^2(K) + 2K^2 \left[1 + \sum_{j=1}^{Nbin} m_{rj}^2 \right] u^2(z) \quad (4.15.2)$$

Con lo scopo di confrontare con i risultati della letteratura del metodo standard (41) e con il metodo automatico analizzato precedentemente, si può calcolare la varianza dei volumi medi:

$$u^2(\bar{V}_{galling}) = \frac{u^2(V_m(m_r))}{n_x n_y} \quad (4.16)$$

$$u^2(\bar{V}_{wear}) = \frac{u^2(V_v(m_r))}{n_x n_y} \quad (4.16.1)$$

$$u^2(\bar{V}_{damage}) = \frac{u^2(V_{VP})}{n_x n_y} \quad (4.16.2)$$

5 Materiali e Metodi

5.1 Caso studio 1: Denti dell'albero scanalato

L'Acquisizione dei dati non è stata diretta nel caso dei denti dello scanalato, ma la prova di usura da *fretting* è stata eseguita mediante un banco prova esterno al DIGEP (banco di prova per alberi scanalati), appositamente progettato e realizzato ai fini di simulare le condizioni operative usuali di questi componenti di macchina (quindi presumibilmente con lubrificazione) e rendere così manifesti gli effetti di usura sui denti; pertanto non sono note le condizioni di input in termini di coppia [Nm], velocità di rotazione [rpm], angolo di disallineamento tra gli alberi e numero di cicli della prova. Gli accoppiamenti scanalati tra albero e mozzo sono in acciaio e verosimilmente nitrurati in superficie, sono trascurati ai fini di questa trattazione i parametri di accoppiamento (modulo, numero dei denti, angolo di pressione e raggio di bombatura).

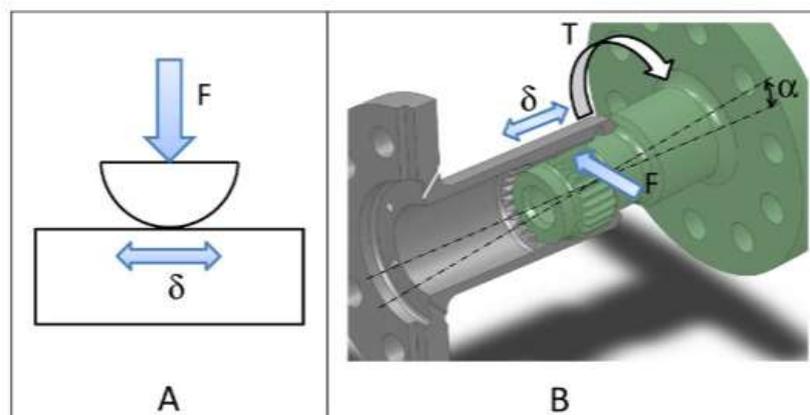


Figura 1.2 Modello dinamico per l'analisi del fretting del dente dell'albero scanalato (a sinistra); Rappresentazione CAD dell'accoppiamento replicato con il Bench test (a destra)

Lo scopo dell'analisi, infatti, non è la valutazione del significato tribologico della caratterizzazione del volume di usura da fretting dello specifico scanalato, con determinate condizioni di accoppiamento geometriche, dinamiche e di materiali, quanto un esercizio di applicazione metodologico di caratterizzazione (e conseguente calcolo di incertezza) dei *Surface topography methods* su superfici di interesse applicativo con una forma 3D non piana; ciò risulta essere un discostamento dal tipo di superfici usualmente analizzate dalla letteratura di riferimento, soprattutto nell'applicazione degli algoritmi di *Computer Vision*, che sono alquanto vincolanti in questo senso. Con la consapevolezza aprioristica di sacrificio di precisione delle misure, e dunque, incertezze più elevate (a causa del RMSE), si è effettuata una procedura che verificasse la ripetibilità e robustezza del metodo: in particolare, il calcolo è stato effettuato per tre denti dell'albero scanalato denominati Dente1 (D1), Dente6 (D6) e Dente11 (D11), la cui topografia è stata rilevata dall'interferometro CSI (2.5x).

I volumi di usura, il *galling* e il danno totale sono stati misurati sfruttando le equazioni introdotte nei capitoli precedenti per i metodi basati sulla topografia superficiale. Le misurazioni delle topografie sono state eseguite da un CSI, uno Zygo NewView 9000. Lo strumento si trova nel Laboratorio di metrologia superficiale presso il Politecnico di Torino, Italia.

L'obiettivo di misurazione utilizzato in questo caso è stato un Michelson $2.5 \times$, con apertura numerica 0,15 e dimensione pixel d di $3,157 \mu\text{m}$. Il vantaggio principale di un ingrandimento così basso è stato un basso tempo di misura (circa 15').

Il lavoro sperimentale si è articolato in tre step (metodi):

1. Applicazione algoritmi Computer Vision: registrazione mediante ICP tradizionale;
2. Caratterizzazione del volume di usura con i metodi topografici 3D;
3. Calcolo dell'incertezza estesa del volume di usura dei due metodi e test d'ipotesi per valutare le differenze tra i metodi.

5.1.1 Applicazione algoritmi Computer Vision: registrazione mediante ICP tradizionale

L'implementazione degli algoritmi relativi alla manipolazione delle nuvole di punti è avvenuta prevalentemente in ambiente Matlab con l'ausilio del software CloudCompare. La *workflow* seguente mostra i passaggi chiave del codice nel *main*; Gli obiettivi finali sono duplici: il primo è l'estrazione di 2 nuvole di punti pre- e post-usura che siano non solo in coordinate omogenee, ma anche direttamente confrontabili in termini di regione di interesse e dimensione; il secondo è avere in output il RMSE per le coordinate in x , y e z dei tre denti, il cui valore di errore è cruciale per il calcolo dell'incertezza del volume di usura.



Figura 5.1 Workflow del codice nel main per la registrazione delle nuvole di punti

- **Caricamento delle due nuvole di punti (pre e post) e parametri di impostazione del microscopio**

Sono state importate in Matlab le nuvole di punti acquisite mediante il microscopio CSI. I dati grezzi, forniti come file testo txt (in mm), sono stati importati e convertiti nell'oggetto Matlab `pointCloud(xyzPoints)`; l'oggetto `pointCloud` memorizza i dati di un insieme di punti scritti nel sistema di coordinate 3-D (coordinate geometriche x , y e z di una superficie campione). Ogni punto può anche essere rappresentato con informazioni aggiuntive, come il colore RGB; queste informazioni dell'oggetto sono archiviate in 'Proprietà' (Location, colore, numero, limite della X, ecc.). Inoltre, sono state inserite le caratteristiche del microscopio ottico come la *pixelsize* (ricavata

sulla base della struttura dei dati) e il numero di punti in x campionati per ogni y nxm (number x moving) della nuvola che deve essere traslata nella registrazione (post-usura).

- **Ottenimento della matrice di trasformazione mediante *CloudCompare (CC)***

La fase di ‘identificazione delle features’ attraverso l’algoritmo di SURF, non può essere applicata, in quanto questo algoritmo si basa su immagini 2D. I denti dello scanalato hanno una forma caratteristica ad evolvente, pertanto la proiezione di una curvatura macrogeometrica in 2D non è semplice e distorce le scale, rendendo l’implementazione dell’algoritmo non funzionante (l’identificazione non è robusta e significativa). La *detection* su una superficie piana è possibile, invece, per l’assenza di forma in 3D, come vedremo nel successivo caso studio.

Perciò sulle nuvole di punti pre- e post-usura dei denti è stata eseguita direttamente una registrazione 3D dei denti mediante un algoritmo ICP tradizionale; in questo caso i *toolbox* di *Image Processing and Computer Vision* di Matlab per motivi di efficienza computazionale, sono stati sostituiti dall’utilizzo del software *Cloud Compare*. Questo è un software che processa nuvole di punti e *mesh* triangolari. Nato in principio per confrontare nuvole di punti da rilievi laser scanner, strumentazione aerofotogrammetrica e droni, e successivamente è stato implementato in un software di elaborazione di nuvole di punti con algoritmi avanzati come proiezioni, registrazioni, segmentazioni, calcolo di distanze; perciò adatto anche per elaborare gli output di microscopi ottici topografici come il CSI. CloudCompare ha la semplicità di non essere un linguaggio General Purpose come Matlab, ma già orientato a facilitare l’elaborazione delle nuvole di punti. In particolare, la Figura 5.2 mostra il flusso di lavoro eseguito per la registrazione:

PARTIALLY OVERLAPPING CLOUD REGISTRATION WORKFLOW IN CLOUDCOMPARE

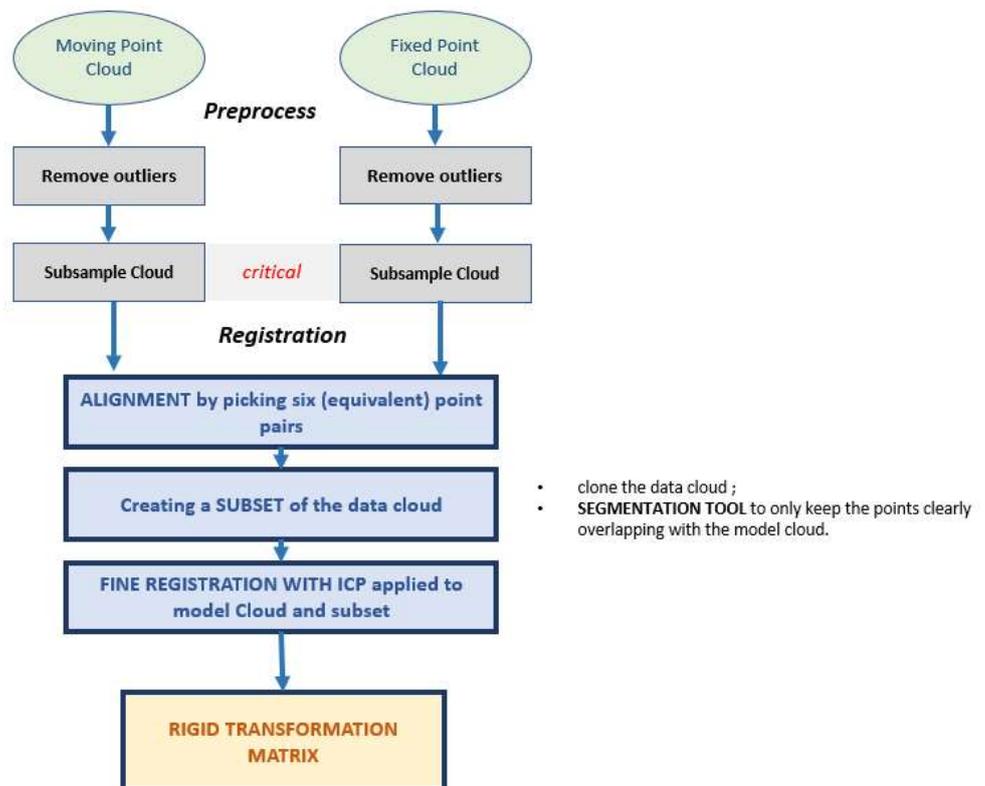


Figura 5.2 Flusso di lavoro per la registrazione delle nuvole di punti in CloudCompare

le nuvole di punti analizzate hanno la caratteristica di essere parzialmente sovrapposte, in quanto la scansione del microscopio topografico non ha portato ad una perfetta coincidenza tra le superfici rilevate pre- e post-usura, banalmente anche solo per una diversa impostazione del fine corsa. In questo caso come *reference* fisso è stata posta la superficie topografica pre-usura, mentre la post è quella mobile, da trasformare mediante matrice di rototraslazione.

Con la finalità ultima di ridurre l'errore residuo è stato dapprima effettuato un pretrattamento dei dati, con la rimozione degli outliers attraverso un apposito filtraggio basato sulla distanza radiale tra i punti, volto ad eliminare quelli isolati e più distanti; in questa fase è stato critico un sotto-campionamento delle nuvole per ridurre la densità e di conseguenza limitare l'onerosità computazionale del calcolo in termini di iterazioni da eseguire: l'algoritmo infatti si ferma o perché raggiunto il livello di errore desiderato, oppure perché ha raggiunto il massimo numero di iterazioni eseguibili; il sotto-campionamento cerca di evitare il verificarsi di questa ultima condizione.

La fase di registrazione vera e propria si è sviluppata in tre step. Dapprima è stato effettuato un allineamento grezzo, con un tool apposito, per cercare di rendere omogenei i due sistemi di riferimento delle nuvole in modo approssimato: l'operazione manuale si riferisce a cercare corrispondenze tra 6 punti accoppiati equivalenti (vincolando i 6 gradi di libertà spaziali, tre di rotazione e tre di traslazione) tra le due clouds; in seguito, per superare il problema della sovrapposizione parziale, si è clonata la nuvola di punti con più informazioni e si è segmentata la porzione di interesse perfettamente sovrapponibile; Per la registrazione fine ICP tra le nuvole di interesse, si è utilizzato la nuvola segmentata temporanea in modo da avere risultati più accurati, in quanto rende la sovrapposizione perfetta. In output al processo si è ottenuto la matrice di rototraslazione.

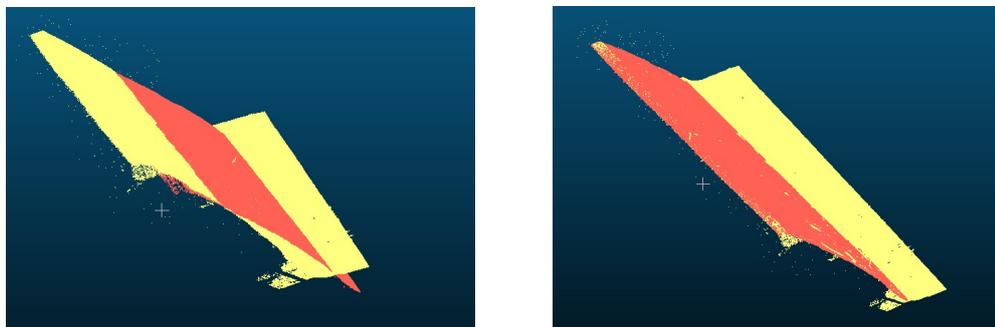


Figura 5.3 registrazione in CloudCompare delle nuvole di punti del Dente1. Nuvole disallineate (a sinistra) e nuvole registrate (a destra)

La figura 5.3 mostra la registrazione in ambiente CloudCompare per ottenere la matrice di rototraslazione del Dente1. A sinistra le nuvole sono disallineate, mentre a destra sono registrate.

- **Applicazione della matrice di trasformazione alla nuvola di punti post-usura**

Una volta ottenuta la matrice di trasformazione con CloudCompare, questa è stata importata in Matlab, come mostrato in figura.

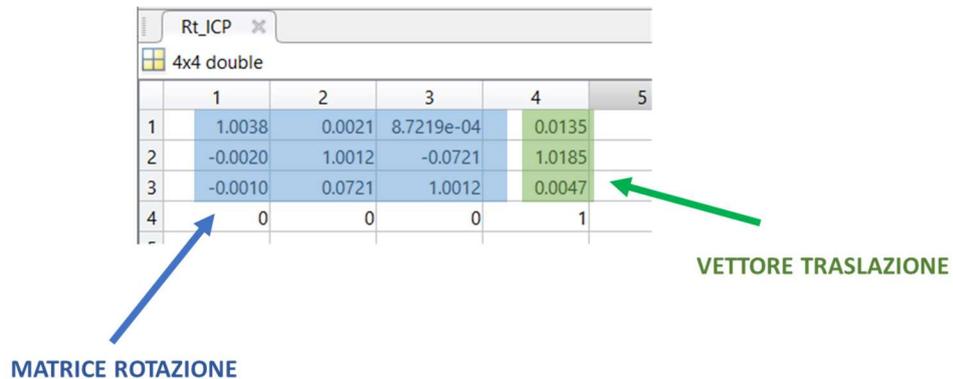


Figura 5.4 esempio di formato matrice rototraslazione 4x4 in Matlab

Per applicare la matrice di trasformazione alla *pointCloud* post-usura si è utilizzata la funzione *built-in* Matlab ‘`ptCloudOut_ICP = pctransform (ptCloudIn, tform)`’. Tale funzione richiede in ingresso la nuvola di punti su cui applicare la trasformazione e la matrice di rototraslazione ma soggetta a trasformazione geometrica 3D affine.

```
%% TRASFORMAZIONE
Rt_ICP=table2array(readtable('ICP1Matrix.mat.txt'));
Rt_ICP=affine3d(Rt_ICP');
ptCloudOut_ICP=pctransform(Post_PC,Rt_ICP);
figure;pcshowpair(Pre_PC,ptCloudOut_ICP);title('registrazione ICP');
registered_ICP= zeros(size(ptCloudOut_ICP.Location));
registered_ICP= ptCloudOut_ICP.Location;
save('post_1_ICP.txt','registered_ICP','-ascii');
```

Figura 5.5 estratto di codice del Main in Matlab per la trasformazione della nuvola di punti mobile.

Per ottenere tale trasformazione si utilizza la funzione *built-in* Matlab `affine3d(tform)` che richiede in ingresso la matrice di trasformazione trasposta. In output si è ottenuto la nuvola di punti rototraslata, la cui Location è stata inserita nella matrice `registered_ICP`.

- **Estrazione della ROI per il calcolo dell'RMSE**

Ora che le due nuvole di punti sono in un sistema di coordinate omogenee, il passo successivo è stata l'identificazione della *Region of Interest* (ROI) sia per la point cloud pre-usura sia per la post-usura. L'obiettivo ultimo di questa fase è avere due nuvole di punti che siano perfettamente confrontabili, in modo da avere due file di testo in output utilizzabili per il software *MountainsMap*, col quale si può fare in modo automatico il *mesh* delle due superfici e si può calcolarne la differenza per determinare il volume di usura. La funzione definita da utente (utilizzata integralmente come fornita) è la **extract_reg_ROI** i cui argomenti sono quelli mostrati dall'estratto di codice in Figura 5.6.

```
%% ESTRAZIONE ROI
tic
[ROI_fixed_SURFICP,ROI_moving_SURFICP,difference_SURFICP,rmse_SURFICP,bias_SURFICP,
 kd_SURFICP,kr_SURFICP]=extract_reg_ROI(Pre_PC.Location,pxl_orderedclean_ICP,pxlsize);
toc
```

Figura 5.6 Funzione usata in Matlab per l'estrazione del Crop

La ratio della funzione è ritagliare la matrice più grande (ovvero la nuvola pre-usura per come è stata misurata, fissa nella procedura di registrazione), riscalandola sulla dimensione della matrice più piccola (post-usura), che essenzialmente coincide con la sua regione di interesse (ROI_moving_SURFICP). È un algoritmo di ricerca che si basa sulla minimizzazione della distanza tra la matrice pre- e post-usura.

La nuvola di punti post-usura (registered_ICP) è però pretrattata in modo da riordinare e uniformare la dimensione delle coordinate che hanno subito una rototraslazione. In tal senso sono eseguite delle operazioni di riordino della struttura dati in modo che sia conforme con quella del microscopio ottico (a parità di y vengono forniti tutti i valori campionati in x), di pulizia (sono state prese le prime 5 cifre significative dell'ordine del centesimo di micron), e di arrotondamento a multipli interi della *pixelsize* (la risoluzione laterale è circa di 3 micron). Infine, la medesima matrice (pxl_orderedclean_ICP) è ulteriormente ripulita attraverso una lettura logica, con l'eliminazione delle righe in cui sono presenti dei NaN.

```
%% Trattamento matrice superficie rototraslata
registered_ICP(:,1:2)=round(registered_ICP(:,1:2),5);
ordered_registered_SURFICP=sortrows(registered_ICP,2);
pxl_ordered_ICP=ordered_registered_SURFICP;
pxl_ordered_ICP(:,1:2)=round(floor(pxl_ordered_ICP(:,1:2)./pxlsize).*pxlsize,4);
nans=~isnan(pxl_ordered_ICP(:,1));
pxl_orderedclean_ICP(:,1)=pxl_ordered_ICP(nans,1);
pxl_orderedclean_ICP(:,2)=pxl_ordered_ICP(nans,2);
pxl_orderedclean_ICP(:,3)=pxl_ordered_ICP(nans,3);
```

Figura 5.7 Codice sul preprocessing della point cloud rototraslata

Dunque, in input alla funzione è fornita la Location della PointCloud pre-usura, la pxl_orderedclean_ICP e la risoluzione laterale che coincide in questo caso con la *pixelsize*.

Gli output della funzione, invece, (trascurando alcuni parametri di controllo come kd e kr) sono le due ROI estratte come matrici e una struttura a tre campi rmse_SURFICP, in cui sono presenti gli errori RMSE in x, y e z sulla base della registrazione della sola regione di interesse.

La Figura 5.8 mostra i RMSE per i 3 denti analizzati, il cui valore è importante per la propagazione dell'incertezza del calcolo del volume di usura. Bisogna considerare che lungo z gli errori sono più

elevati a causa della differente topografia delle superfici legata alla deformazione di *fretting*, ma l'ordine di grandezza resta quello del decimo di micron.

RMSE[μm]	D1	D6	D11
<i>x</i>	0,501	0,494	0,504
<i>y</i>	0,495	0,503	0,497
<i>z form+ICP residuals</i>	0,598	0,7827	0,7911

Figura 5.8 RMSE espresso in μm per i tre denti registrati

Per cercare comunque di depurare il più possibile l'errore di forma dal RMSE (media delle differenze quadratiche) su *z*, il calcolo di stima dell'errore è stato fatto su una porzione/ *crop* della superficie macroscopicamente non deformata (segmentata attraverso MountainsMap). La robustezza dello stimatore è comunque garantita dall'utilizzo di migliaia di migliaia di punti; Altrimenti l'escursione di usura, dell'ordine di decine di micron, potrebbe impattare in modo significativo sull'errore: questi algoritmi sono infatti normalmente utilizzati per allineare superfici 3D identiche.

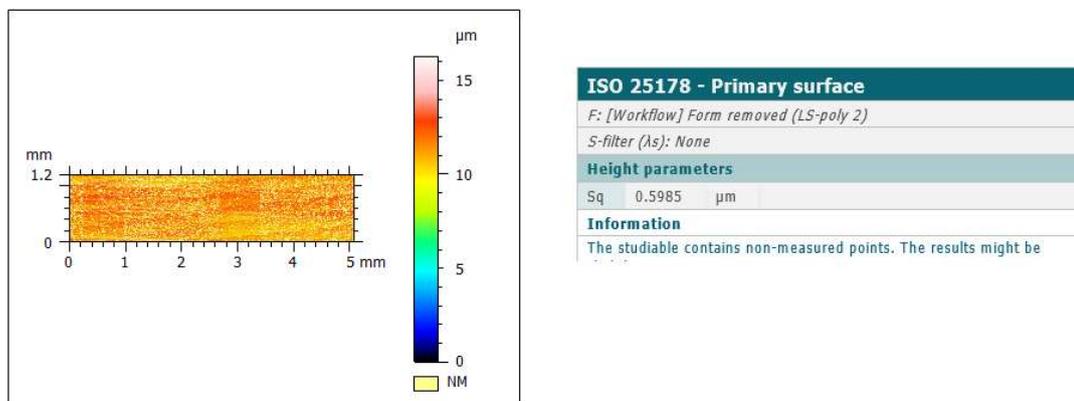


Figura 5.9 Estrazione superficie indeformata per il calcolo RMSE lungo *Z* mediante MountainsMap

La Figura 5.9 mostra il calcolo del RMSE lungo *z* per il Dente1: Lo studiabile mostrato è la differenza delle due ROI pre- e post-usura precedentemente calcolate; il parametro topografico *Sq* della differenza delle superfici topografiche, calcolato su un'area parziale esente da deformazioni macroscopiche (per quanto l'usura da *fretting* sia distribuita su tutto il fianco), è assimilabile al RMSE lungo *z*. Il parametro associato allo studiabile mostra un valore di 0.5985 μm .

5.1.2 Caratterizzazione del volume di usura con i metodi topografici 3D

La caratterizzazione del volume di usura è stata eseguita interamente su *MountainsMap*, che è un software specifico per la metrologia superficiale e l'analisi di immagini, la cui applicazione principale è la micro-topografia (la scienza che studia la *texture* superficiale e le forme 3D su scala microscopica).

Il *Workflow* seguito per caratterizzare i denti è quello illustrato nella Figura 5.10

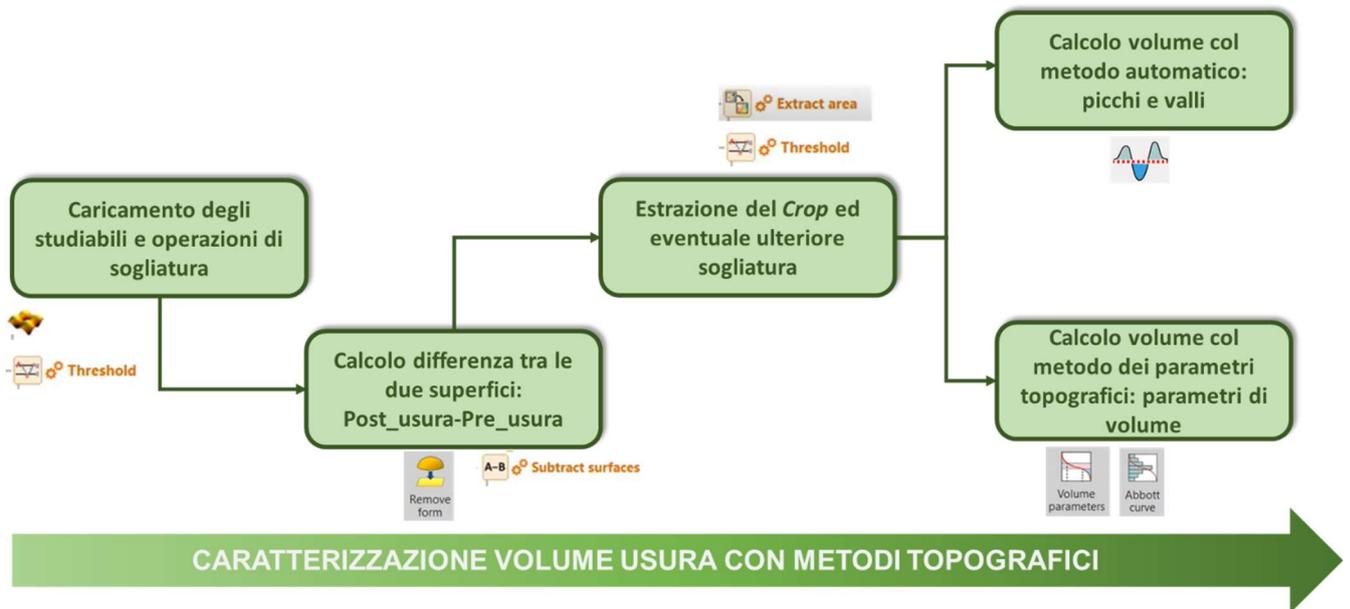


Figura 5.10 Workflow per la caratterizzazione del volume di usura eseguito in *MountainsMap*

Dapprima sono stati caricati i due studiabili ROI_fixed_SURFICP e ROI_moving_SURFICP ottenuti precedentemente dalla registrazione sottoforma di file txt.

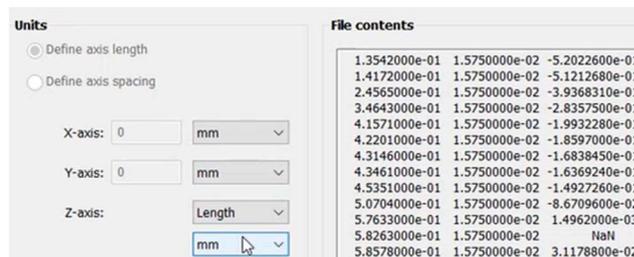


Figura 5.11 Esempio di lettura delle nuvole di punti 3D del Software *MountainsMap*

Inoltre, sugli studiabili, dove necessario, è stato applicato l'operatore di *Thresholding*, ovvero sono stati rimossi i punti di rumore, gli errori di lettura, gli outliers che distorcevano la scala lungo Z (le misurazioni topografiche soffrono di questi artefatti di misura): l'operazione è stata effettuata selezionando la zona di interesse lungo Z, mediante due *sliders*, direttamente sulla curva della distribuzione delle altezze e di Abbott-Firestone degli studiabili. Un esempio si ha in Figura 5.12.

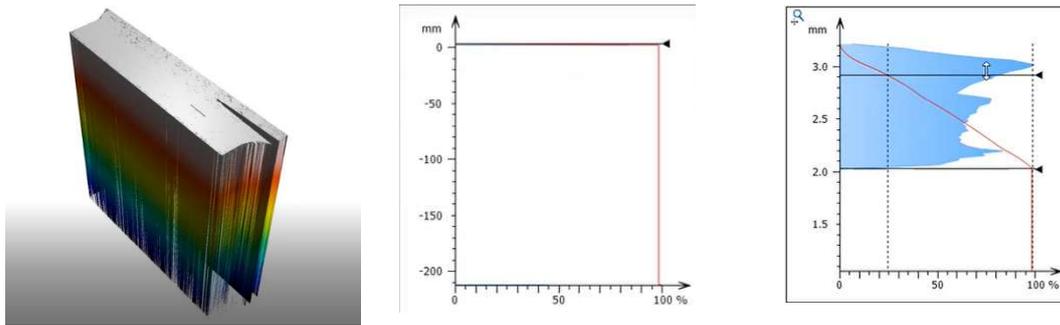


Figura 5.12 operazione di thresholding dello studiabile moving del Dente11: a sinistra si ha una vista 3D dello studiabile prima di essere processato, al centro la curva di Abbott-Firestone con la scala deformata, a destra viene mostrata la selezione del materiale.

Nell'esempio riportato la distorsione di quota fino a 200 mm rende non individuabile la distribuzione del materiale (appiattita sull'asse delle ascisse), e la cumulata in rosso tende al 100% del rapporto superficiale in modo quasi verticale su tutta la scala, a causa di poco materiale residuo come gli *spikes*. La soglia riportata il range studiato in valori compatibili con la distribuzione del materiale (azzurro).

Dopo aver importato e ripulito le superfici pre e post-usura, il software permette di calcolare la differenza tra le due superfici: nell'applicazione dell'operatore, è stata presa come superficie di riferimento la superficie post-usura, a cui è stata sottratta quella pre-usura, creando così un nuovo studiabile, simile a quello mostrato in Figura 5.13, il quale è la base per la caratterizzazione del volume di usura. Per come è stata definita la differenza, le valli della nuova superficie topografica sono rappresentative di una rimozione di materiale (usura vera e propria), viceversa i picchi sono il materiale riportato, aggiunto ad esempio per via del *galling*. Pertanto, l'intero studiabile rappresenta il danno totale.

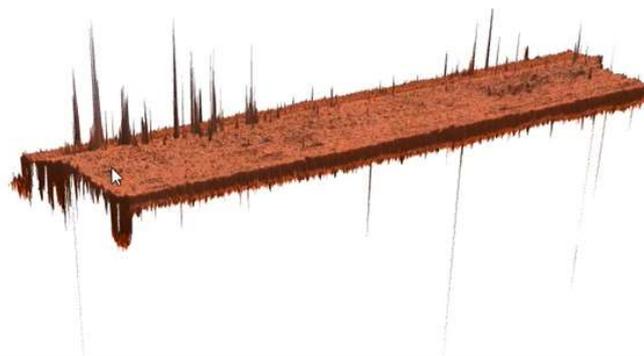


Figura 5.13 Studiabile oggetto di caratterizzazione, ottenuto mediante l'operazione di sottrazione delle superfici post-usura – pre-usura nel caso del Dente11

Talvolta è necessario procedere ad una rimozione della forma residua della superficie differenza: un errore di forma può verificarsi come residuo di errori di registrazione oppure per la presenza di deformazioni plastiche permanenti sul fianco del dente a seguito del test di fretting. La figura 5.14 mostra la rimozione di forma nel caso del Dente1 attraverso l'utilizzo di una polinomiale di dodicesimo ordine.

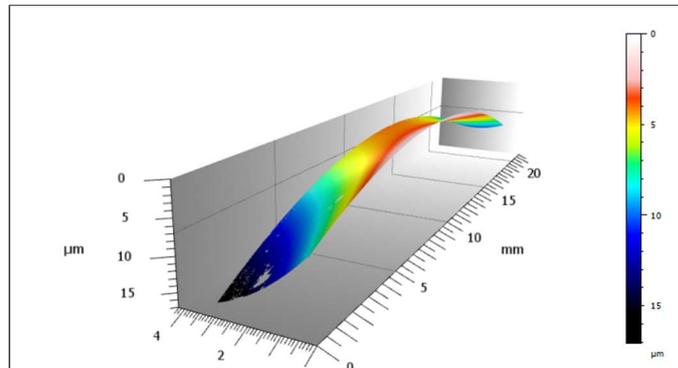


Figura 5.14 fitting di una polinomiale di dodicesimo ordine per la rimozione di un errore di forma, Immagine fa riferimento al Dente1

Sui fianchi dei denti si ha un'usura distribuita da fretting, ma è necessario comunque estrarre un *crop* che elimini gli effetti di bordo e quelle aree in cui avviene l'ingranamento tra i denti, come la radice del dente o la parte iniziale del fianco che non è mai in contatto. Perciò con un operatore di estrazione di area rettangolare è stata estratta manualmente solo la ROI rappresentativa del fenomeno che si vuole caratterizzare.

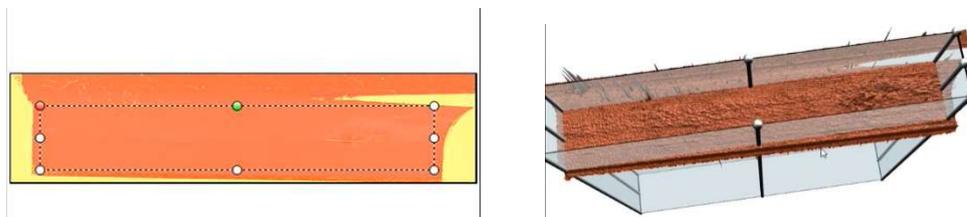


Figura 5.15 Rimozione della superficie non soggetta a ingranamento e rimozione degli effetti di bordo. Vista in 2D dell'operatore di estrazione ROI manuale (a sinistra), vista 3D (a destra). Operatore fa riferimento al Dente11

Si è arrivato così allo studiabile desiderato, che è la superficie deformata finale, oggetto della caratterizzazione con approccio volumetrico. La figura 5.16 ne mostra un esempio di visualizzazione in 3D a colori; questi ultimi fanno riferimento alla scala lungo z, che mostra un'escursione ragionevole dell'ordine del decimo di micron.

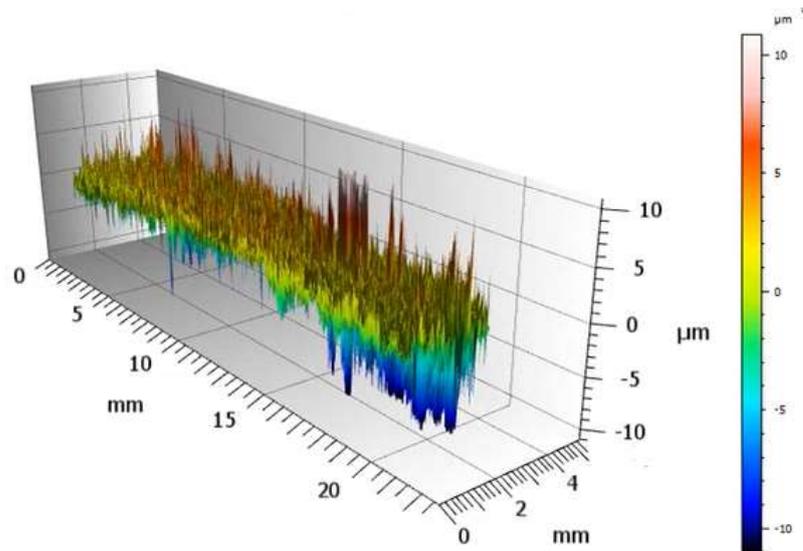


Figura 5.16 Visualizzazione 3D dello studiabile finale che rappresenta il danno d'usura, oggetto di caratterizzazione nel caso del Dente11

Il software *MountainsMap* permette di effettuare direttamente sia il calcolo del volume con metodo automatico, sia con il metodo dei parametri topografici. In particolare, quest'ultimo metodo numerico, per confronto con i risultati del software, è stato ricostruito manualmente con un foglio di calcolo sulla base delle equazioni teoriche.

Il **Metodo Automatico** è stato implementato con l'operatore che calcola direttamente il volume dei picchi e delle buche dell'area desiderata e fornisce in output anche l'area proiettata corrispondente ai picchi e l'area proiettata corrispondente alle valli.

Di default il software estrae in modo automatico N profili (dove N è il numero di pixel lungo y dello studiabile), ognuno dei quali viene considerato centrato su una risoluzione laterale dy , ai fini del calcolo del volume in 3D; per ogni profilo, lungo la direzione x, viene calcolata la superficie delle valli e delle creste rispetto ad una linea di riferimento, individuata prendendo la secante degli estremi (coordinate $x=0$ e $x=22$ mm) del profilo. La conseguenza, però, di avere un livello di riferimento diverso per ogni profilo, introduce nel calcolo delle deformazioni e lo rende poco comparabile col metodo dei parametri di volume (il piano di riferimento è unico per tutta la superficie). È stato necessario, dunque, calcolare un piano indeformato unico rispetto al quale riferire il calcolo di tutti i profili estratti automaticamente. A tal proposito, è stata introdotta un'operazione fittizia ulteriore di rimozione forma sulla superficie dello studiabile, dopo aver fittato e poi rimosso un piano dei minimi quadrati, stabilendo così la linea di zero del calcolo. In questo modo, il calcolo su tutti i profili estratti per la caratterizzazione col calcolo automatico di *MountainsMap*, dei picchi e delle buche, è stato riferito a quel piano unico.

Anche il **Metodo dei parametri topografici** è quasi del tutto automatizzato dal software: viene fornita la curva di Abbott-Firestone dello studiabile e sono già implementate le equazioni numeriche per il calcolo dei volumi, ma è necessario, anche qui, individuare il riferimento unico per il calcolo. Similmente il riferimento può essere trovato fittando un piano dei minimi quadrati o utilizzando un piano medio delle altezze in una zona indeformata della topografia. Le coordinate di tale piano, in termini di quota e rapporto materiale superficiale, devono essere sfruttate sulla curva di Abbott per discriminare il materiale rimosso (void volume) dal materiale apportato per irritamento (material volume).

Sulla base della curva di Abbott-Firestone estratta, per **verifica** del metodo, sono state implementate manualmente su un foglio di calcolo le equazioni numeriche discrete per il calcolo dei volumi. Segue la descrizione dei due step percorsi:

- **Calcolo del fattore di conversione areale K:**

Dapprima è stato calcolato il fattore di conversione areale K: si è tenuto conto della *pixelsize* (intesa come area unitaria in questo caso, ovvero il prodotto delle due risoluzioni laterali in y e x estratte dalla struttura dati), del numero di pixel in x e y (*#py*, *#px*) e della percentuale dei punti non misurati (o non letti dal software) *NMR%* (da cui i punti misurati (*#py * #px * (1- NMR%)*); la formula usata è stata la 4.11.2 ridefinita come: $K = (\#py * \#px * (1-NMR%) * pixelsize * 0,000001)$.

#py	1688	#px	7153
pxlsize	9,972883	9,97	
NMR%	67,25%		
A	39,43598068 mm ²		
meas points	3,95E+06		

Figura 5.19 Calcolo del fattore di copertura K manuale per la verifica del metodo parametrico implementato su MountainsMap

- **Costruzione dell'integrale della curva per via numerica:**

L'ampiezza infinitesima delle classi Δz_j , in cui è stata frazionata l'asse delle quote, è stata definita sulla base dei valori esportati con MountainsMap della curva di Abbott (z_i, z_j) in modo che $\Delta z_j = z_i - z_j$. E ad ogni *bin* è stata attribuita un'altezza pari a m_{rj} , discretizzando così la funzione continua mediante un istogramma con un numero di *bin* N_{bin} pari a 1000 (di default). Dopo aver calcolato l'area di ogni classe $\Delta z_j * m_{rj}$ e aver individuato le coordinate h e m_r del punto di riferimento, sono stati calcolati il volume materiale e il volume dei vuoti con le formule 4.11 e 4.11.1.

Z / μm	cdf / %	cdf / -	dz / μm	
0	0	0,0000000		dz*cdf
0,001992	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	0
0,003983	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,005975	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,007967	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,009958	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,01195	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,013942	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
0,015933	2,57E-05	2,571E-07	0,001992	5,12E-10
19,9146	100	1	0,002	0,002
19,9166	100	1	0,002	0,002

Figura 5.20 Esempio di calcolo numerico effettuato sul foglio di calcolo per la valutazione del volume di usura e del volume del galling col metodo dei parametri volumetrici.

5.1.3 Incertezza dello strumento

Dovremmo avere degli artefatti tarati per caratterizzare il sistema di misura utilizzando la metodologia statistica, nel nostro caso il microscopio CSI; ma per motivi di efficienza ma anche robustezza, come si è già detto, gli artefatti tarati non sono stati utilizzati, quindi invece di fare una stima di tipo A, ovvero stimare i contributi in modo statistico, è stata eseguita una stima di tipo B: è stata utilizzata la valutazione delle caratteristiche metrologiche definita nella letteratura tecnico-scientifica e nella normativa. In particolare, il riferimento per la valutazione dei principali contributi sono stati i lavori di Giusca, Leach, Maculotti, Weckenmann e altri (31,32,35).

contributo	MCs inglobate	asse	valore (Stima tipo B da Giusca CSI 20x)	valore (Stima tipo B da Giusca CSI 50x)	unità	Distribuzione
uNM	NM, zFLT	z	0,8	1,0	nm	Normale
uz	α, l	z	< 10	< 10	nm	Normale
ux	$\alpha, l, \Delta(x,y)$	x	~100	~50	nm	Normale
uy	$\alpha, l, \Delta(x,y)$	y	~100	~100	nm	Normale
uWR	WR	z	~0.6	~0.3	μm	Uniforme

Figura 5.21 contributi di categoria B delle caratteristiche metrologiche dello strumento CSI per due ingrandimenti (20x,50x)

La tabella mostra i valori che si riferiscono alla caratterizzazione del nostro strumento CSI con due ingrandimenti diversi a 20x e 50x. L'ordine di grandezza del rumore e della deviazione dalla planarità, valutati insieme, quindi NM e Z_{FLT} , è circa un nanometro; l'incertezza sull'asse z, proveniente dalla linearità, è di circa sui 10 nm, mentre sull'asse x e y circa 100 nm (considerando che α viene aggiustato, e $\Delta(x,y)$ vengono sfruttati per calcolare $\alpha x,y$). L'ultimo contributo WR, ovvero la risoluzione laterale, è circa grande tanto quanto la pixelsize (Weckenmann).

Guardando i valori si può notare che non cambiano in modo eccessivo tra un ingrandimento e l'altro. Pertanto, visto che le misure nel nostro caso sono state fatte a 2.5x, è stato lecito prendere, in modo conservativo come valori ragionevoli, quelli provenienti da informazioni di letteratura riferiti a un ingrandimento 20x.

contributo	MCs inglobate	asse	sorgente	valore	unità	
uNM	NM, zFLT	z	Giusca	1	nm	
uz	α, l	z	Giusca	10	nm	
ux	$\alpha, l, \Delta(x,y)$	x	Giusca	100	nm	
uy	$\alpha, l, \Delta(x,y)$	y	Giusca	100	nm	
uWR	WR	z	Zygo	902	nm	uniforme
upxl	d	x,y	Giusca	638	nm	triangolare
			u(x)	10,04988	nm	
			u(y)	907,5263	nm	
			u(z)	907,5263	nm	

Figura 5.22 contributi di incertezza tipo di misura sui tre assi x, y e z legati alle caratteristiche metrologiche dello strumento CSI

La tabella 5.22 sintetizza i contributi di incertezza tipo effettivi utilizzati per le misure e l'incertezza tipo dello strumento sui 3 assi x, y e z. Il valore di risoluzione laterale utilizzato è stato quello fornito dal produttore dello strumento Zygo, la cui semi-ampiezza è pari alla metà della pixelsize ($\pm 1,563 \mu\text{m}$).

5.1.4 Test di ipotesi per confrontare i metodi

Ipotizzando verosimilmente che le misure del volume di usura col metodo automatico e dei parametri abbiano una distribuzione gaussiana, un metodo rigoroso per confrontare i due approcci in termini di capacità di stima del volume medio è fare un t-test per valutare la differenza tra le medie. Definendo la stima del volume medio dei 2 metodi rispettivamente \overline{V}_{M1} e \overline{V}_{M2} e l'incertezza tipo del parametro $u(\overline{V}_{M1})$ e $u(\overline{V}_{M2})$, si può effettuare il test sui parametri impostando un livello di fiducia convenzionale in ambito metrologico pari al 95% e quindi un rischio di errore bilaterale α di rifiutare l'ipotesi nulla anche se è vera pari al 5%.

L'ipotesi nulla del test H_0 è la seguente:

$$H_0: \mu_{V_{M1}} - \mu_{V_{M2}} = 0 \quad (5.1)$$

$$H_1: \mu_{V_{M1}} - \mu_{V_{M2}} \neq 0 \quad (5.2)$$

La statistica test può essere scritta come:

$$\frac{\overline{V}_{M1} - \overline{V}_{M2}}{s^*} = t_0 \quad (5.3)$$

Per valutare opportunamente s^* occorrerebbe fare un test F per testare l'ipotesi nulla $H_0: \sigma_{V_{M1}} = \sigma_{V_{M2}}$. Ma al di là del rifiuto o meno di quest'ultima, nel caso generale di varianze della popolazione non note e non uguali, si può definire s^* come:

$$s^* = \sqrt{u(\overline{V}_{M1})^2 + u(\overline{V}_{M2})^2} \quad (5.4)$$

con $u(\overline{V}_{Mi}) = \frac{u(V_{Mi})}{\sqrt{n_i}}$ e, n_i : numerosità dei campioni, con $i=1,2$. Per calcolare i gradi di libertà del t-test si dovrebbe usare la seguente equazione:

$$v = \frac{(u(\overline{V}_{M1})^2 + u(\overline{V}_{M2})^2)^2}{\frac{(u(\overline{V}_{M1})^2)^2}{n_1 - 1} + \frac{(u(\overline{V}_{M2})^2)^2}{n_2 - 1}} \quad (5.6)$$

Anche se, semplificando il calcolo, in accordo col metodo P.U.Ma, il fattore di copertura può essere valutato con 30 gradi di libertà (in una scala non lineare, un'informazione molto robusta può essere valutata con 100 gdl, una poco credibile con 15 gdl, mentre una intermedia con 30).

Ad un livello di confidenza p del 95%, l'ipotesi nulla H_0 è rifiutata se:

$$t_0 \notin [t_{0.025,30}; t_{0.975,30}] \quad (5.7)$$

Come è solito fare nell'ambito della metrologia, gli stessi risultati possono essere ottenuti qualitativamente confrontando le barre delle incertezze: se non si sovrappongono, si può evidenziare una differenza sistematica tra i due metodi e viceversa. Perciò nel lavoro sperimentale, in accordo con la tradizione letteraria in questo ambito, si è fatto un confronto grafico qualitativo tra i due metodi confrontando le stime intervallari dei due valori medi, sempre calcolate con 30 gdl e un rischio di

prima specie del 5%. Definendo per ogni stima $\overline{V_{Ml}}$ un'incertezza estesa pari a $t_{1-\frac{0.05}{2},30} u(\overline{V_{Ml}})$ e dunque un intervallo fiduciario:

$$\left[\overline{V_{Ml}} - t_{1-\frac{0.05}{2},30} u(\overline{V_{Ml}}); \overline{V_{Ml}} + t_{1-\frac{0.05}{2},30} u(\overline{V_{Ml}}) \right] \quad (5.8)$$

5.2 Caso studio 2: caratterizzazione usura provino piano SiC-Al

Il quadro teorico, introdotto nei capitoli precedenti, è stato applicato anche al caso studio 2 per valutare le prestazioni dei metodi disponibili per la stima del volume di usura nei Test di Modello tribologici Pin-on-Disc. Tale test è stato eseguito utilizzando un tribometro Anton Paar TRB (Laboratorio di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia) con la configurazione Pin-on-Plate lineare.

Il campione testato è stato un provino piano di materiale composito SiC / Al, con contenuto in volume di carburo di silicio del 70% e substrato in lega di alluminio AA356.2, prodotto da un processo di produzione *stir casting*. Il provino è stato utilizzato senza rivestimenti e pulito con acetone prima di essere testato. Le proprietà del materiale oggetto di studio sono riportate in figura 5.23.

Parameter	Value
Heat conductivity/(w/(m·k))	226.4
Thermal expansion/(mm ² /s)	90.105
Density/(g/cm ³)	2.97
Specific heat capacity /(J/(g·k))	0.846
Elasticity modulus/GPa	190

Figura 5.23 proprietà fisiche del materiale SiC-Al del provino piano

Il materiale è stato testato contro una sfera dal diametro di 10 mm di Allumina Al₂O₃ (ripulita con acetone) per generare una traccia di usura lineare senza lubrificazione. È stato condotto un test con una ripetizione singola: è stato ritenuto sufficiente un solo test sul campione poiché il focus di questo lavoro di ricerca è sulla misurazione del volume d'usura stessa piuttosto che il suo significato tribologico. Il ciclo di test è stato eseguito con una durata di 10:25 minuti sotto un carico di 2 N e una velocità lineare massima di 2,5133 cm/s. L'ampiezza massima lineare della traccia di usura è stata settata a 4 mm. L'ambiente tribologico è stato caratterizzato da una temperatura di 25° Celsius e un'umidità del 31%.

La Figura 5.24 mostra il tribometro utilizzato per eseguire il test e lo schema del layout pin-on-plate lineare con cui è stato configurato.

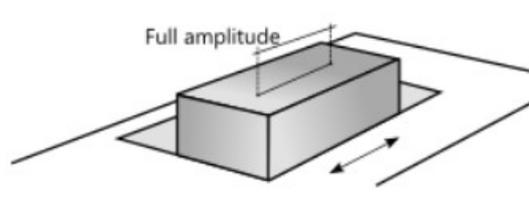


Figura 5.24 Illustrazione del tribo-test Anton Paar TRB (Laboratorio di Meccanica, Politecnico di Torino, Italia) utilizzato (a sinistra); configurazione Pin-on-Plate lineare del test di modello (a destra)

Alla fine del test, il campione è stato accuratamente pulito con acetone per rimuovere i detriti di usura e le tracce di usura sono state ispezionate per calcolare il volume del danno superficiale sfruttando le equazioni già introdotte.

Anche per questo caso studio, le misurazioni ottiche topografiche sono state eseguite dallo stesso CSI Zygo NewView 9000 utilizzato per l'applicazione precedente, ma è stata valutata una risoluzione laterale superiore sfruttando lo stesso obiettivo ma con un ingrandimento superiore: un Michelson 5.5×, con un'apertura numerica 0.15 e una *pixel size* d di 1.56 μm . È comunque un ingrandimento basso che ha permesso misure veloci, ma più elevato rispetto ai denti poiché l'usura non è più distribuita su tutto il fianco del dente ma localizzata in una sezione ridotta nell'intorno della pista di usura generata.

La panoramica della configurazione sperimentale e dei metodi di misurazione del volume è quella mostrata in Figura 5.25.

Surface topography-based method	Automatic (MountainsMap®)	Volume parameters
Instrument setup	CSI 5.5×	

Figura 5.25 Setup del microscopio ottico topografico per due metodi utilizzati

Anche in questo caso i metodi del lavoro sperimentale si sono articolati nei tre step visti col caso studio precedente (applicazione algoritmi Computer Vision, caratterizzazione del volume di usura con i metodi topografici 3D, calcolo dell'incertezza estesa del volume di usura stimato con i due metodi). Pertanto, non verranno ripetuti molti step metodologici utilizzati in questo caso studio, essendo già stati esposti.

Ma oltre al confronto classico, attraverso un test d'ipotesi, per valutare le differenze tra i metodi topografici superficiali automatico e parametrico, è stata eseguita un'ulteriore analisi.

In questo caso, infatti, l'utilizzo di un test standardizzato e universale e la geometria piana e semplice del provino, con assenza di una forma in 3D (al contrario dell'evolvente dei denti dello scanalato), ha permesso l'implementazione robusta degli algoritmi proposti dalla letteratura scientifica (Takimoto e altri) per valutare l'usura superficiale con le tecniche di *Image Processing* (12). Così, dopo aver catturato le nuvole di punti pre- e post-tribotest mediante l'interferometro ottico, la registrazione ICP è stata eseguita mediante il supporto della *Features Recognition* (SURF). Il SURF, attraverso la *detection* delle *features* in 2D, ha permesso l'individuazione delle corrispondenze per la registrazione in 3D.

Si è voluta testare, quindi, l'efficacia della caratterizzazione del volume di usura e della sua incertezza calcolate mediante SURF+ICP (consigliato dalla letteratura) con quella ottenuta mediante registrazione ICP convenzionale; valutando se l'implementazione dell'algoritmo di registrazione ICP preceduto dal SURF comporta una differenza significativa delle stime delle misure rispetto al solo ICP e se fornisce un miglioramento in termini di incertezza delle misure. Se così fosse, infatti, sarebbe giustificata la maggiore complessità implementativa dell'ICP rafforzato con un miglioramento delle performance metrologiche.

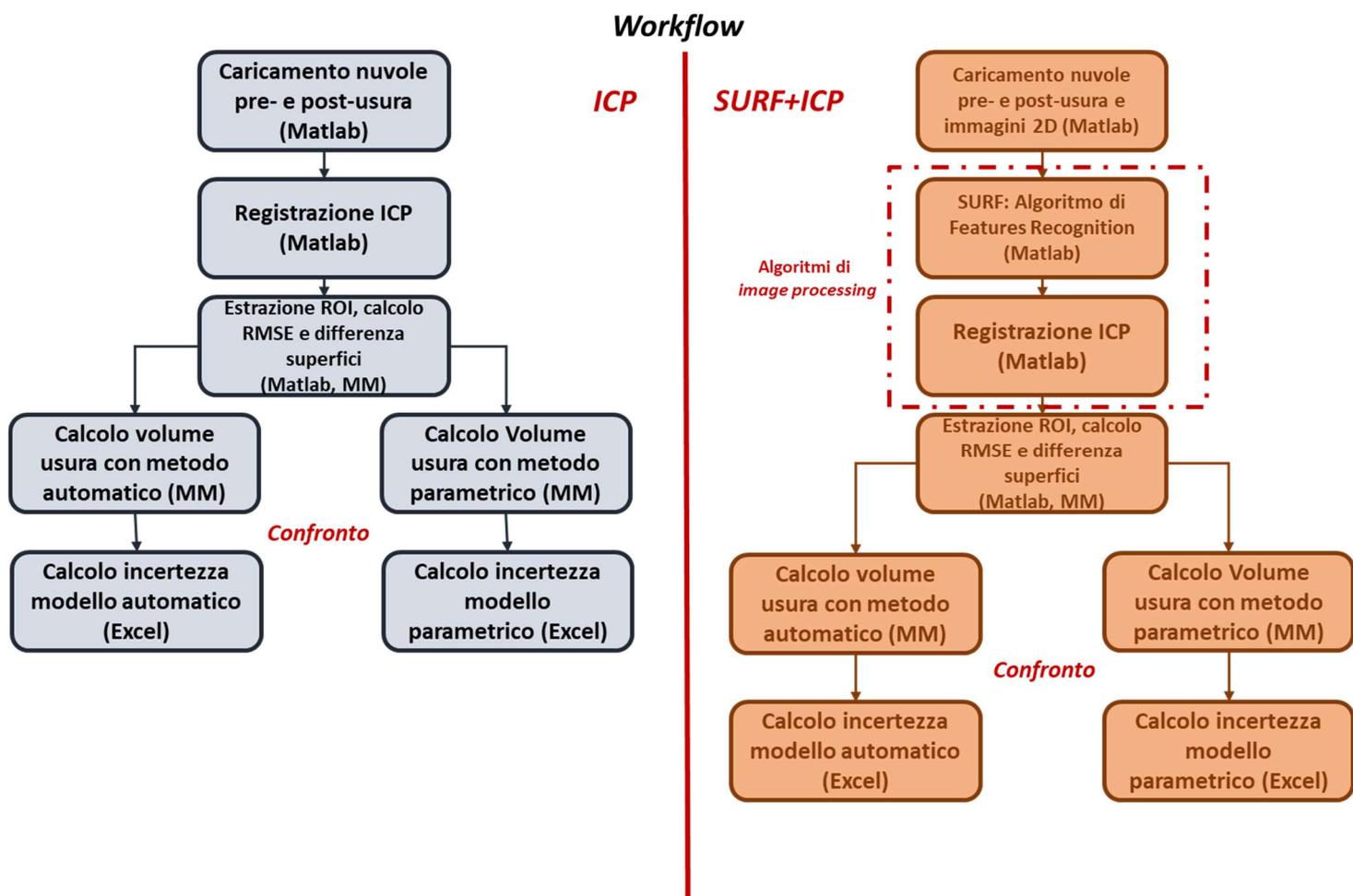


Figura 5.26 Flussi di lavoro eseguiti per la caratterizzazione del volume d'usura e relativa incertezza. In un caso (a sinistra) si è effettuata una registrazione ICP semplice, nell'altro (a destra) si è utilizzato l'uso di un algoritmo di features detection (SURF)

Per quanto riguarda questa applicazione tutto il *workflow* relativo alla registrazione è stato eseguito interamente con i *toolbox* di Image Processing e Computer Vision di Matlab, in quanto la geometria semplice del provino e l'elaborazione di un numero di punti inferiore (*crop* limitato alla zona di esecuzione del test), ha permesso l'utilizzo delle funzioni *built-in* in modo efficiente a livello computazionale. Per l'utilizzo del SURF è stato necessario importare e leggere le immagini 2D pre- e post-usura e convertirle da RGB in scala di grigi, in quanto l'algoritmo richiede questa accortezza. Dopo aver eseguito la *detection* dei punti chiave, la registrazione mediante l'algoritmo ICP è stata eseguita mediante la funzione $[tform, movingReg] = pcregistericp(moving, fixed)$, che restituisce una trasformazione rigida (*tform*) che registra una nuvola di punti in movimento in una nuvola di punti fissa e la nuvola di punti già trasformata come oggetto *pointCloud* Matlab (*movingReg*).

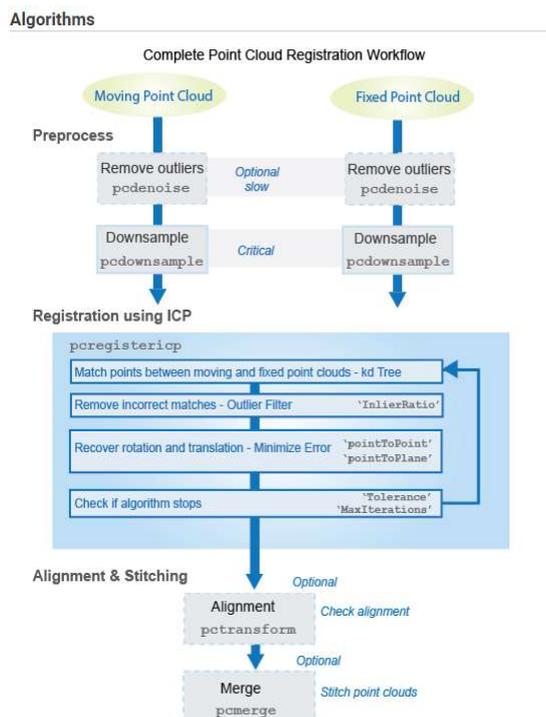


Figura 5.27 Schema delle fasi dell' algoritmo di registrazione ICP in Matlab

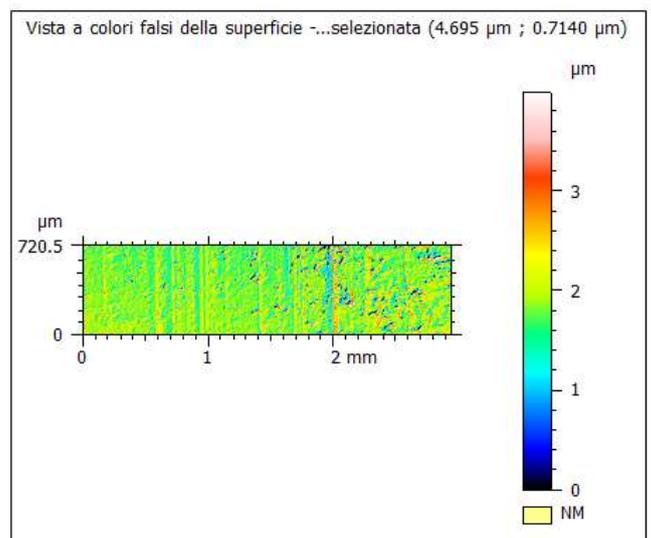
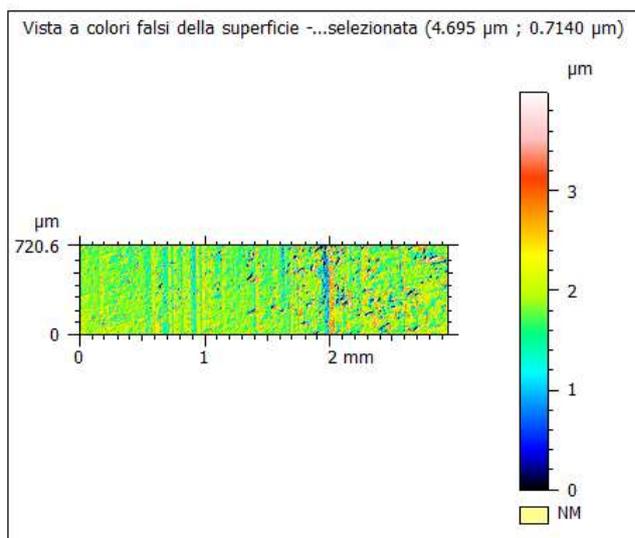
La Figura 5.27 mostra gli step dell' algoritmo implementato applicando la funzione descritta, nel caso aggiuntivo di un *preprocessing* con rimozione degli outliers e sottocampionamento per aumentare l'accuratezza e l'efficienza della registrazione.

I passaggi relativi all' estrazione delle ROI sono analoghi al caso studio dei denti.

Metodo	RMSE x / nm	RMSE y / nm	RMSE z / nm
ICP	288	116	531
SURF+ICP	288	116	440

Figura 5.28 RMSE della registrazione delle superfici del SiC-AI nel caso ICP e SURF+ICP

La Figura 5.28 mostra i RMSE del provino nel caso di registrazione con ICP singolo oppure ICP rafforzato; L' applicazione differente degli algoritmi non modifica l' errore lungo x o y ma impatta solo su z: l' utilizzo del SURF mostra una diminuzione dell' errore, che si propagherà nell' incertezza, seppur gli ordini di grandezza sono comparabili e dell' ordine del decimo di micron. Analogamente a quanto fatto con i denti, anche qui è stato depurato l' errore di forma dal RMSE z, ripetendo il calcolo su un crop della superficie estratto su *MountainsMap*, lontano dalla traccia di usura, eliminando così l' effetto deformazione. Analisi in BATCH hanno garantito la confrontabilità delle operazioni sui due studiabili differenti.



ISO 25178 - Superficie primaria	
F:	Nessuno
Filtro S (λ_s):	Nessuno
Parametri di altezza	
Sq	0.5314 μm
Informazioni	
Lo studiabile contiene punti non misurati. I risultati potrebbero essere	

ISO 25178 - Superficie primaria	
F:	Nessuno
Filtro S (λ_s):	Nessuno
Parametri di altezza	
Sq	0.4397 μm
Informazioni	
Lo studiabile contiene punti non misurati. I risultati potrebbero essere	

Figura 5.29 Calcolo RMSE lungo z mediante l'estrazione di un'area indeformata nel caso di uno studiabile registrato con ICP (a sinistra) e SURF+ICP (a destra).

6 Risultati

6.1 Caso studio 1: caratterizzazione volume usura del Dente1, Dente6, Dente11

6.1.1 DENTE1 (D1)

Vengono di seguito illustrati i risultati della caratterizzazione del volume del danno di usura per il Dente1.

- Studiabile ROI_fixed_SURFICP D1

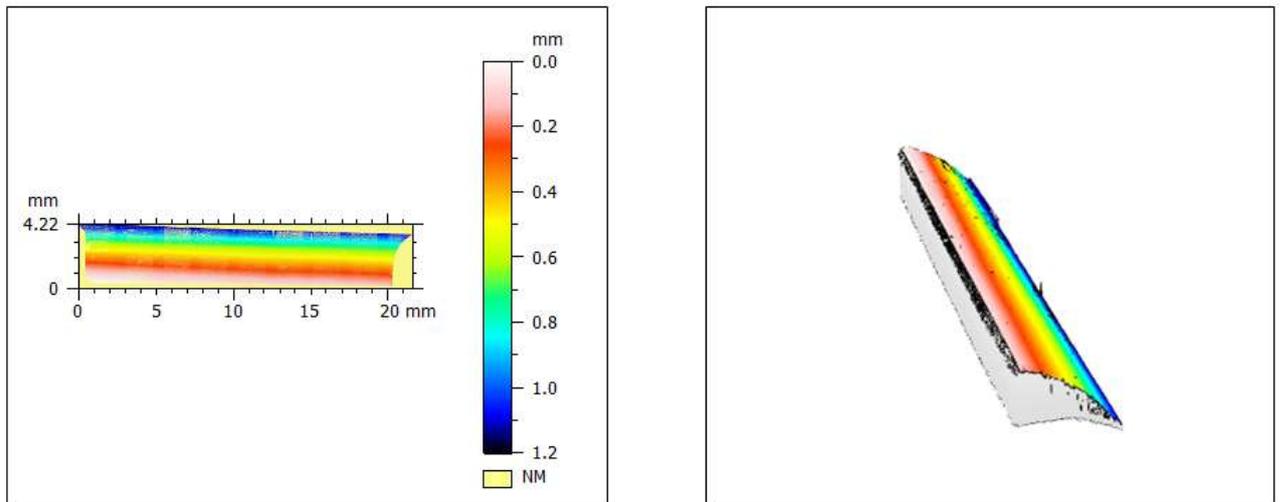


Figura 6.1 topografia del dente D1 pre-usura elaborata tramite MountainsMap. A sinistra vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra vista in 3D

- Studiabile ROI_moving_SURFICP D1

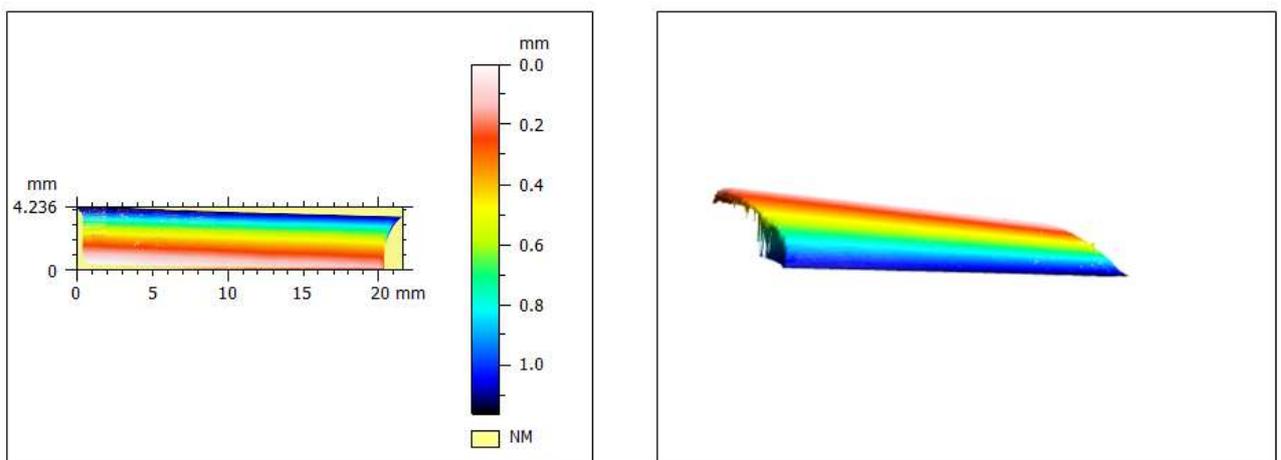


Figura 6.2 topografia del dente D1 post-usura elaborata tramite MountainsMap. A sinistra vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra vista in 3D

- Differenza post- e pre-usura D1 e rimozione della forma

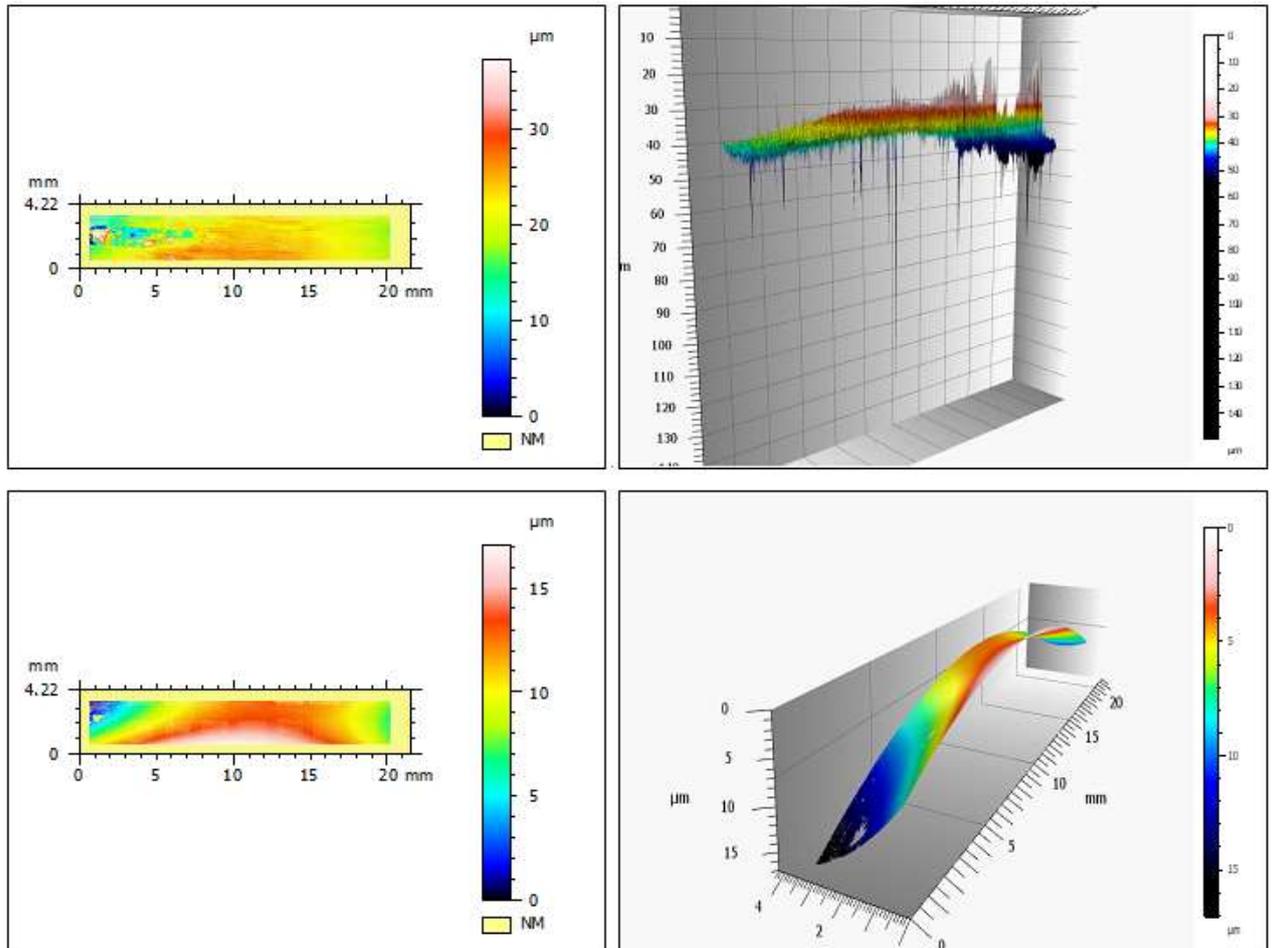


Figura 6.3 in alto si ha il risultato della sottrazione delle topografie post-usura-pre-usura del Dente1. A sinistra si ha la vista 2D del nuovo studiabile e a destra la vista 3D. In basso è illustrato il fitting della forma dello studiabile mediante polinomiale, a sinistra in vista 2D e a destra in vista 3D.

La topografia differenza ha mostrato una curvatura macrogeometrica; l'errore di forma, pertanto, è stato rimosso fittando una polinomiale sulla topografia superficiale; l'immagine 3D mostra la forma parabolica col vertice nella zona centrale dello studiabile (rosso in figura), la cui freccia massima è approssimabile con l'escursione massima in z, cioè circa $17 \mu\text{m}$.

- Studiabile finale D1 e caratterizzazione

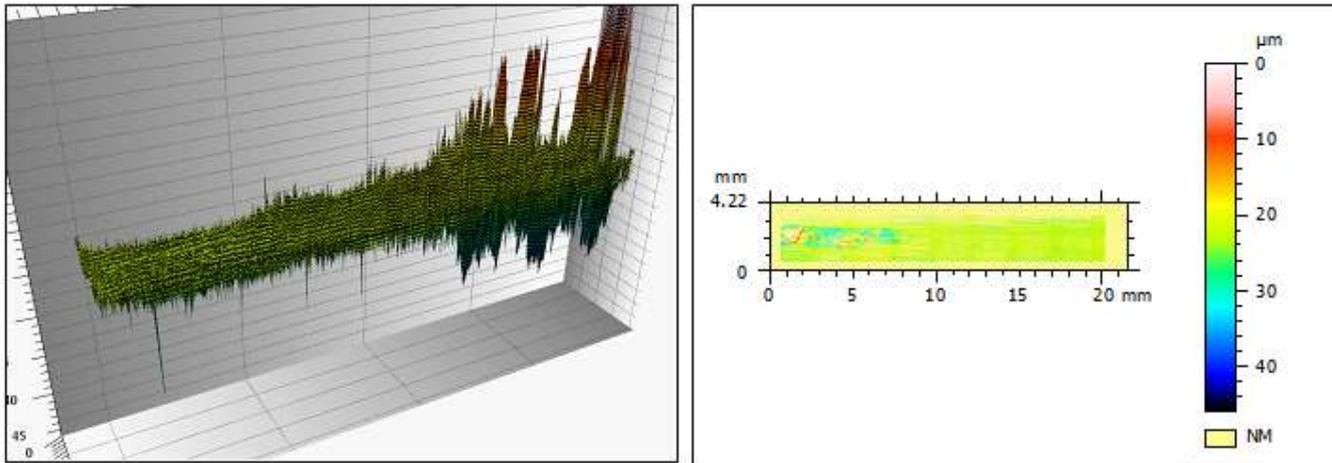


Figura 6.4 Danno da usura risultante D1 dopo aver rimosso gli errori di forma e gli outliers. A sinistra si ha una vista 3D dello studiabile mentre a destra una vista 2D

Identity card			
Name:	ROIMOVING_DENTE1 > Difference between two		
Studiable type:	Surface		
Axis:	X		
Length:	21.59	mm	
Size:	6857	points	
Spacing:	3.149	μm	
Offset:	0.0126	mm	
Axis:	Y		
Length:	4.220	mm	
Size:	1341	points	
Spacing:	3.149	μm	
Offset:	-5.269	mm	
Axis:	Z		
Layer type:	Topography		
Length:	45.99	μm	
Min:	-22.46	μm	
Max:	23.53	μm	
Size:	459929	digits	
Spacing:	0.1000	nm	
NM-points ratio:	64.63 % (5942942 Pts)		

Figura 6.5 Carta d'identità dello studiabile finale del Dente1

Lo studiabile finale, le cui caratteristiche sono descritte nella carta d'identità, è stato oggetto di caratterizzazione con i due metodi. Il piano di riferimento per la curva di Abbott è stato individuato in corrispondenza di un rapporto superficiale pari a 17,27% e una quota di circa 22 μm .

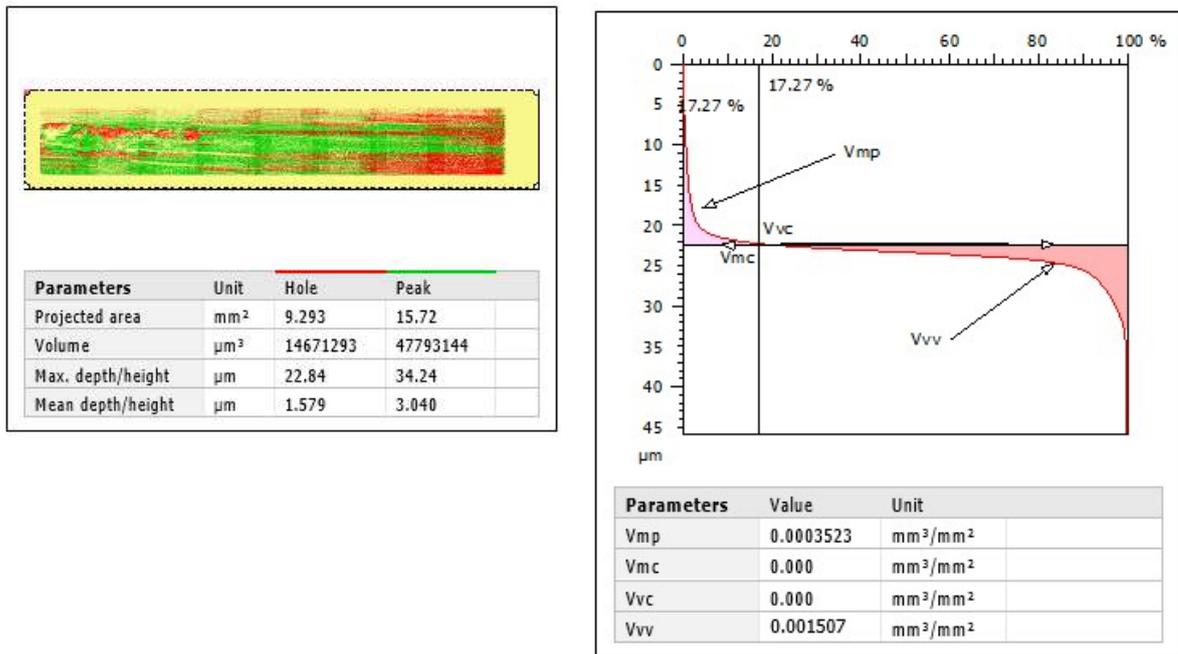


Figura 6.6 caratterizzazione del danno d'usura del Dente1 con il Metodo automatico attraverso MountainsMap (a sinistra); caratterizzazione del danno d'usura del Dente1 con il Metodo dei parametri volumetrici attraverso MountainsMap (a destra)

I valori dei due metodi sono forniti dal software in unità di misura differenti, seguono le tabelle con i confronti:

	Metodi topografici D1	
	Metodo automatico	Metodo parametrico
Area totale/mm ²	2,50E+01	3,23E+01
Volume materiale apportato/mm ³	4,78E-02	1,14E-02
Volume usura/mm ³	1,47E-02	4,86E-02
Volume del danno totale/mm ³	6,25E-02	6,00E-02

Figura 6.7 Confronti dei volumi d'usura, volume del galling e volume del danno totale calcolati con i due metodi per il Dente1

<i>differenze assolute D1/mm³</i>	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00E+00	2,50E-03
Metodo parametrico		0,00E+00
<i>differenze percentuali D1</i>	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00%	4,00%
Metodo parametrico		0,00%

Figura 6.8 Differenze assolute (sopra) e differenze percentuali tra i due metodi nel calcolo dei volumi del danno totale per D1

Il danno totale calcolato col metodo automatico è di $6,25E-02 \text{ mm}^3$, mentre col metodo dei parametri topografici è $6,00E-02 \text{ mm}^3$.

La differenza percentuale tra i due metodi del calcolo del volume del danno totale è del 4% per il Dente1, mentre la differenza assoluta è dell'ordine del μm^3 .

La tabella seguente mostra i contributi di incertezza necessari per il calcolo dell'incertezza composta del volume totale del danno del Dente1. Ai contributi legati allo strumento ottico, già presentati nel precedente paragrafo, sono stati aggiunti quelli legati alla registrazione mediante ICP e all'operazione di sottrazione delle superfici topografiche lungo l'asse z.

Contributi registrazione e differenza topografie su z (D1)			
Contributi	Valore [nm]	asse	sorgente
uregx	501	x	Registrazione
uregy	495	y	Registrazione
uregz	598	z	Registrazione
u(x)	1037	x	strumento+registr
u(y)	1034	y	strumento+registr
u(z)	598	z	strumento+registr
upxl	638	x,y	Giusca

Figura 6.9 Contributi di incertezza tipo composta delle misure lungo l'asse x, y e z che tengono conto dello strumento, della registrazione e della sottrazione tra superfici topografiche per D1

I contributi lungo l'asse x e y sono dell'ordine del micron, mentre lungo l'asse z sono dell'ordine del decimo di micron.

Il calcolo dell'incertezza per il dente1 è stato eseguito sia per il metodo automatico, che per il metodo dei parametri volumetrici, secondo il framework già descritto nel capitolo 4. Seguono i risultati del calcolo dell'incertezza del volume totale medio, eseguito sfruttando la varianza della media campionaria, considerando che i campioni dei due metodi hanno una numerosità diversa N e MP, rispettivamente per il metodo automatico e parametrico.

MODELLO AUTOMATICO (N(pt y)=1341)				
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %
Vtot D1	6,25E-02	4,85E-07	6,97E-04	1,12%

MODELLO PARAMETRICO (Punti Misurati MP=3252355)					
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %	u(V) [mm ³] valori singoli
Vtot D1	6,01E-02	1,11E-09	3,33E-05	0,06%	6,01E-02

Figura 6.10 Calcolo dell'incertezza tipo dei valori medi del volume del danno totale del D1 per il modello automatico (in alto) e modello parametrico (in basso)

Si può notare che l'incertezza tipo dei valori medi del modello parametrico è dell'ordine del centomillesimo del millimetro cubo, mentre del metodo automatico del decimillesimo del millimetro cubo, quindi in quest'ultimo caso la dispersione è superiore.

Il grafico 6.12 mostra il calcolo della stima del volume medio del danno totale con i due metodi e mostra l'incertezza riferita alla distribuzione della media campionaria del volume del danno totale.

E[V]/mm ³	Vmin	V	Vmax
MM	6,11E-02	6,25E-02	6,39E-02
parametrico	6,0071E-02	6,0137E-02	6,0204E-02

Figura 6.11 calcolo dei limiti della stima intervallare del volume medio totale per il D1, sia per il metodo automatico che per il metodo parametrico

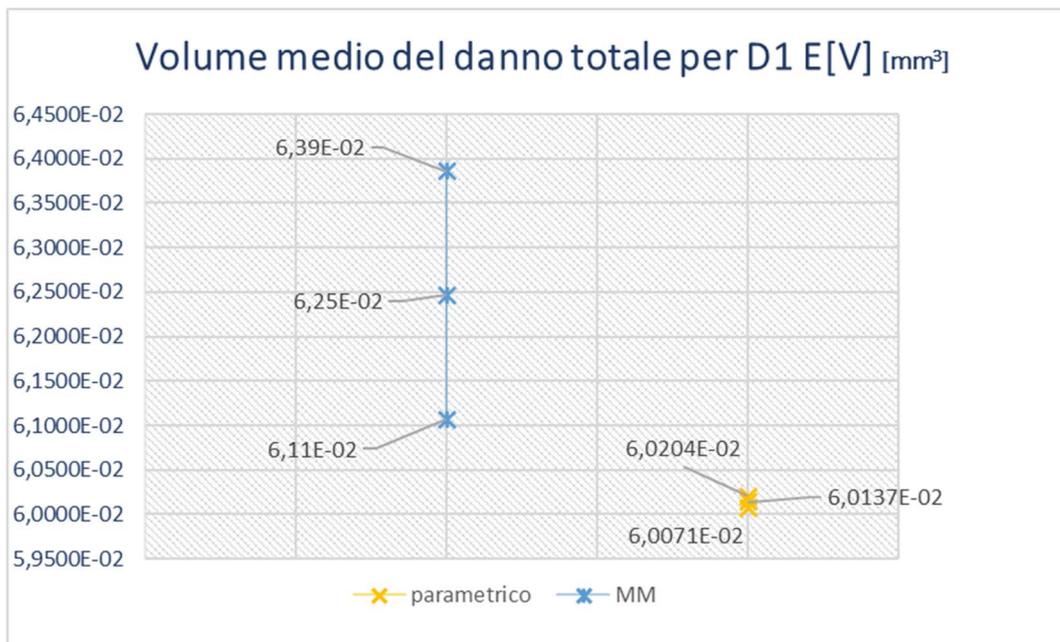


Figura 6.12 rappresentazione delle barre di incertezza e della stima del volume medio del danno totale per il D1 calcolate con il metodo parametrico (giallo) e automatico (blu). I valori sono calcolati con un livello di fiducia pari al 95% e 30 gradi di libertà

Le barre d'incertezza calcolate per i due metodi non si sovrappongono. Il 'valore vero' del parametro è incluso, per entrambi i metodi, nell'intervallo con una probabilità del 95%. Il fatto che questi intervalli non si sovrappongano, evidenzia una differenza sistematica nella caratterizzazione del volume di usura, tra i due metodi applicati sulla superficie topografica del dente1.

Pertanto, la differenza tra le due medie è significativa con il 5% di rischio di errore (in realtà anche con l'1% di rifiutare l'ipotesi H_0 anche se è vera, eseguendo un t-test). L'incertezza relativa del metodo parametrico è del 0,06%, mentre del metodo automatico del 1,12%. Quindi tra i due è preferibile il metodo parametrico, essendo la variabilità dei valori molto inferiore e quindi mostra una precisione superiore. Ciò dipende fortemente dalla numerosità elevata del campione usato dal metodo parametrico per fare le stime. L'incertezza tipo calcolata sui valori singoli, infatti, è comparabile e dell'ordine del centesimo del millimetro cubo, mentre l'incertezza dei valori medi cambia notevolmente. Si può notare, però, come l'incertezza relativa del modello parametrico sia particolarmente bassa rispetto alla soglia attesa (circa del 0,50%).

6.1.2 DENTE6 (D6)

Vengono di seguito illustrati i risultati della caratterizzazione del volume del danno di usura per il Dente6.

- Studiabile ROI_fixed_SURFICP D6

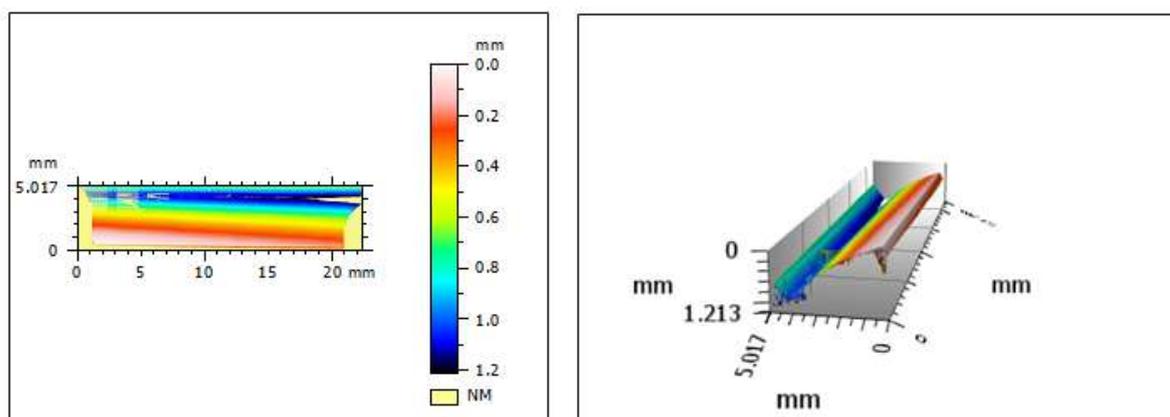


Figura 6.13 topografia del dente D6 pre-usura elaborata tramite MountainsMap. A sinistra vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra vista in 3D

- Studiabile ROI_moving_SURFICP D6

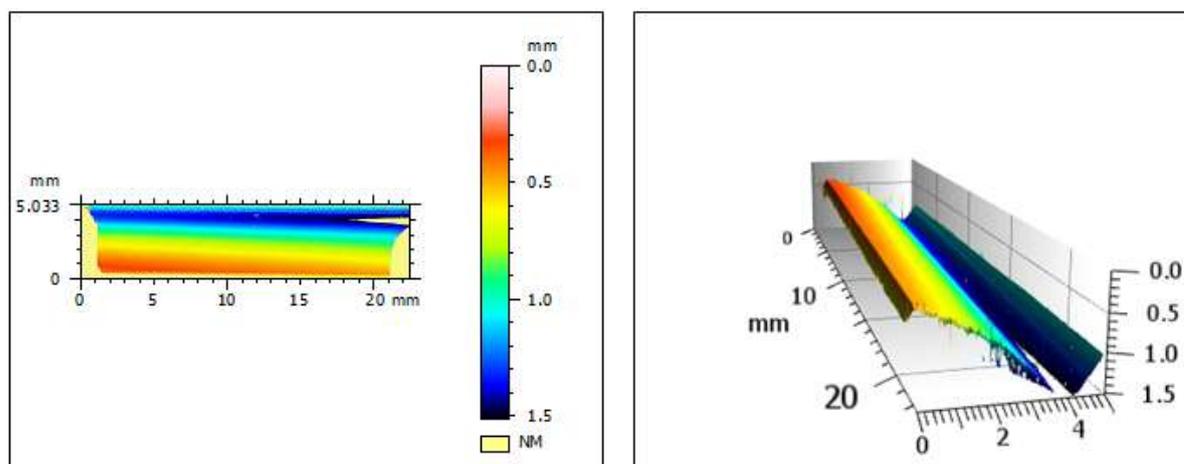


Figura 6.14 topografia del dente D6 post-usura elaborata tramite MountainsMap. A sinistra vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra vista in 3D

- Differenza post- e pre-usura D6 e rimozione della forma

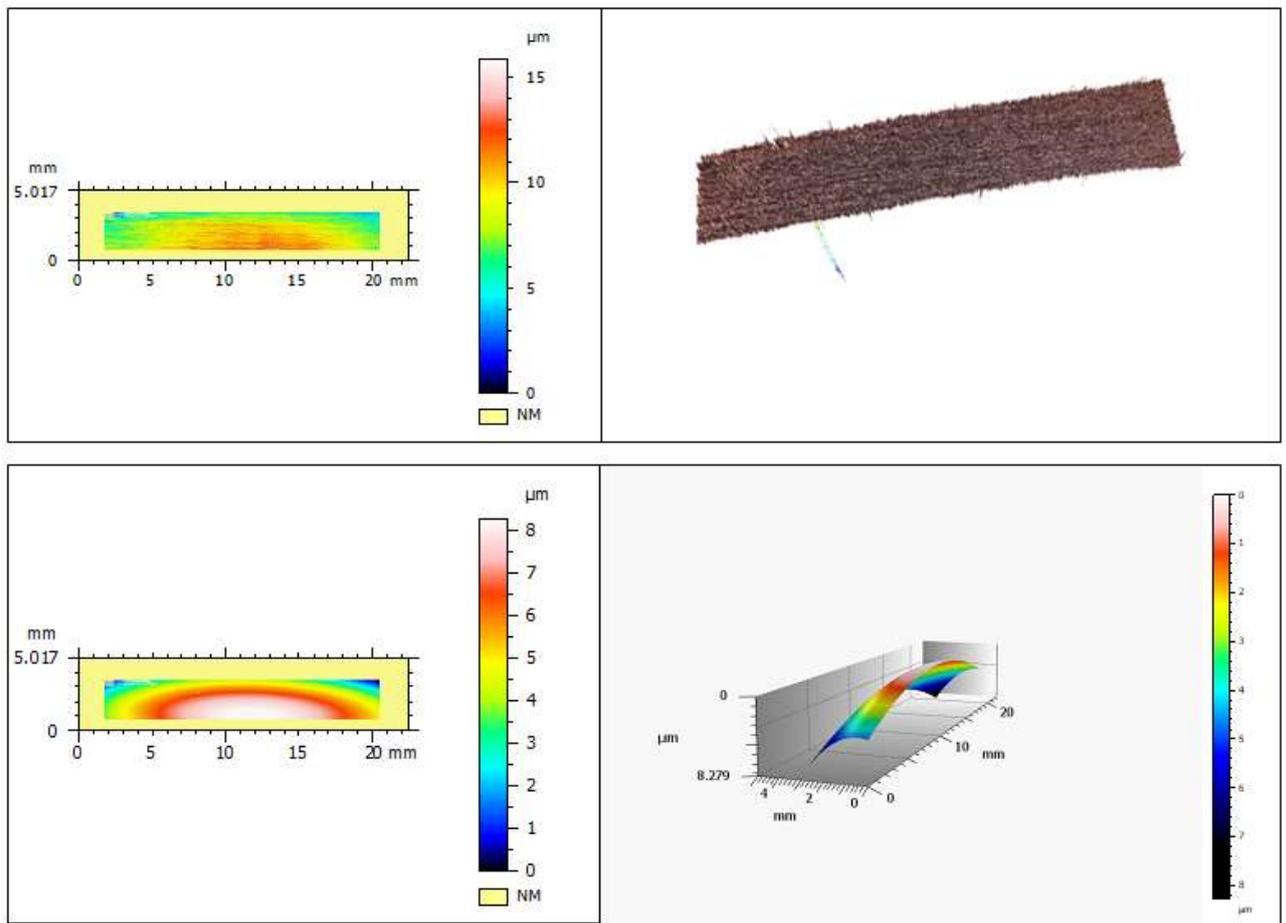


Figura 6.15 in alto si ha il risultato della sottrazione delle topografie post-usura-pre-usura del Dente6. A sinistra si ha la vista 2D del nuovo studiabile e a destra la vista 3D. In basso è illustrato il fitting della forma dello studiabile mediante polinomiale, a sinistra in vista 2D e a destra in vista 3D.

Anche in questo caso la topografia differenza mostra un errore di forma, il quale è stato rimosso, ma rispetto al D1 l'escursione massima è inferiore e di circa 8 μm.

- Studiabile finale D6 e caratterizzazione

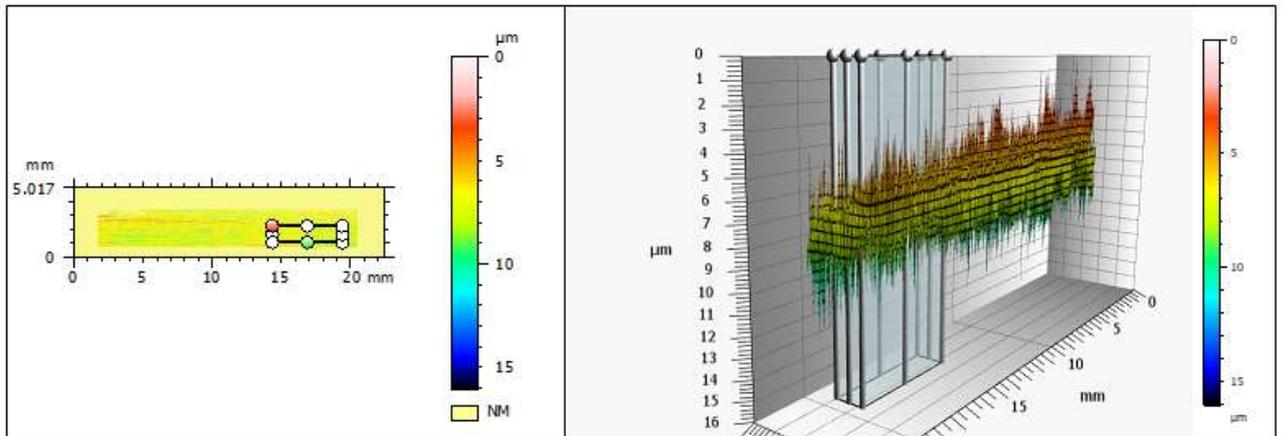


Figura 6.16 Danno da usura risultante D6 dopo aver rimosso gli errori di forma e gli outliers. A sinistra si ha una vista 2D dello studiabile mentre a destra una vista 3D

Identity card			
Name:	ROIMOVING_DENTE6 > Difference between two		
Studiabile type:	Surface		
Axis: X			
Length:	22.48	mm	
Size:	7046	points	
Spacing:	3.191	µm	
Offset:	0.0126	mm	
Axis: Y			
Length:	5.017	mm	
Size:	1594	points	
Spacing:	3.149	µm	
Offset:	-5.511	mm	
Axis: Z			
Layer type:	Topography		
Length:	16.07	µm	
Min:	-8.911	µm	
Max:	7.156	µm	
Size:	160668	digits	
Spacing:	0.1000	nm	
NM-points ratio:	66.88 % (7511761 Pts)		

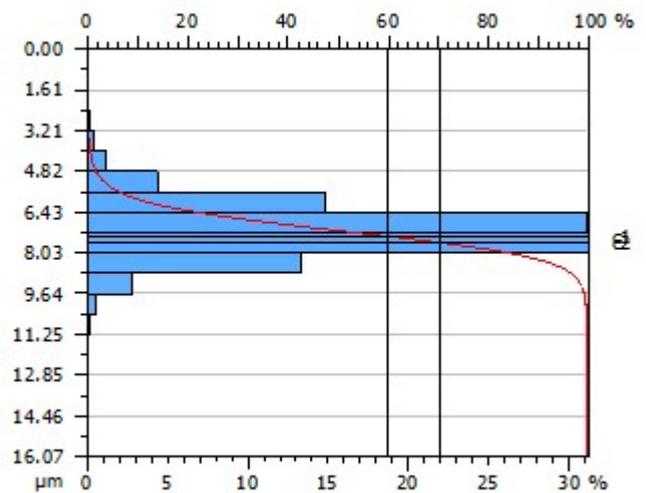


Figura 6.17 Carta d'identità dello studiabile finale del Dente6 (a sinistra); curva di Abbott-Firestone del volume d'usura totale del Dente6 (a destra)

Le immagini mostrano le caratteristiche dello studiabile finale e la sua distribuzione delle altezze e relativa cumulata. Anche in questo caso è stata eseguita la caratterizzazione con i due metodi: Il piano di riferimento per la curva di Abbott è stato individuato in corrispondenza di un rapporto superficiale pari a 60,3% e una quota di circa 7,65 µm.

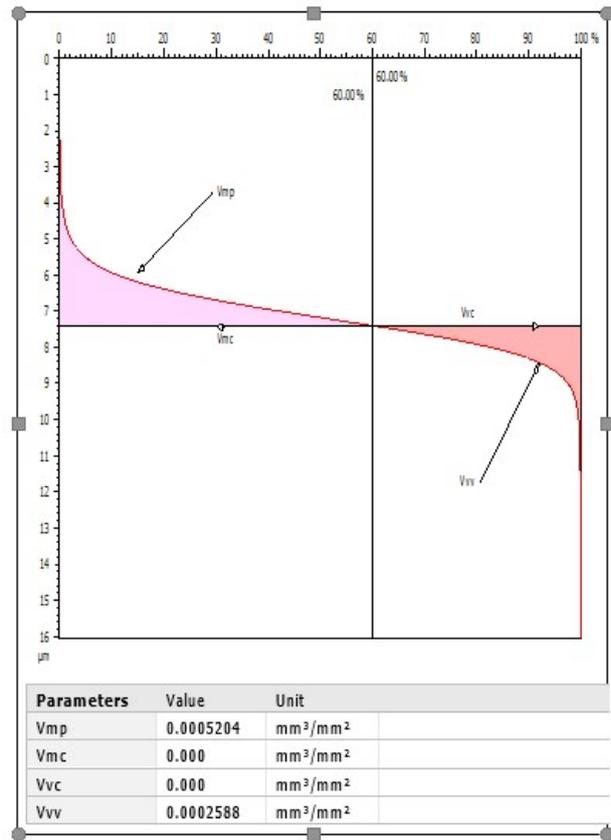
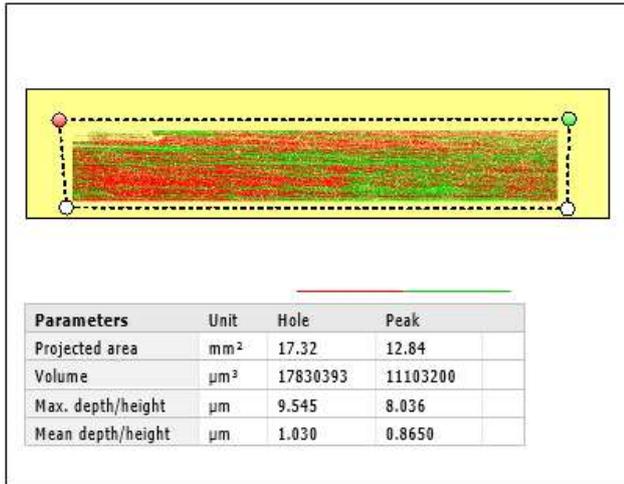


Figura 6.18 caratterizzazione del danno d'usura del Dente6 con il Metodo automatico attraverso MountainsMap (a sinistra); caratterizzazione del danno d'usura del Dente6 con il Metodo dei parametri volumetrici attraverso MountainsMap (a destra)

	Metodi topografici D6	
	Metodo automatico	Metodo parametrico
Area totale/mm ²	3,02E+01	3,74E+01
Volume materiale apportato/mm ³	1,11E-02	1,95E-02
Volume usura/mm ³	1,78E-02	9,67E-03
Volume del danno totale/mm ³	2,89E-02	2,91E-02

Figura 6.19 Confronti dei volumi d'usura, volume del galling e volume del danno totale calcolati con i due metodi per il Dente6

Il danno totale calcolato col metodo automatico è di $2,89E-02 \text{ mm}^3$ mentre col metodo dei parametri topografici è $2,91E-02 \text{ mm}^3$. La differenza percentuale tra i due metodi del calcolo del volume del danno totale è del 0,66%, mentre la differenza assoluta è $1,92E-04 \text{ mm}^3$.

<i>differenze assolute D6/mm³</i>	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00E+00	-1,92E-04
Metodo parametrico		0,00E+00

<i>differenze percentuali D6</i>	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00%	-0,66%
Metodo parametrico		0,00%

Figura 6.20 Differenze assolute (sopra) e differenze percentuali tra i due metodi nel calcolo dei volumi del danno totale per D6

Anche per il dente6 sono riportati i contributi di incertezza legati alla registrazione tra le superfici topografiche pre- e post-usura e legati alla differenza tra le topografie lungo l'asse Z. L'incertezza lungo x e y è dell'ordine del micron, mentre lungo z del decimo di micron. Inoltre, la Figura 6.22 mostra i risultati del calcolo dell'incertezza della media campionaria del volume totale del danno per i due metodi.

Contributi registrazione e differenza topografie su z (D6)			
Contributi	Valore [nm]	asse	sorgente
uregx	494	x	Registrazione
uregy	503	y	Registrazione
uregz	783	z	Registrazione
u(x)	1033	x	strumento+registr
u(y)	1038	y	strumento+registr
u(z)	783	z	strumento+registr
upxl	638	x,y	Giusca

Figura 6.21 Contributi di incertezza tipo composta delle misure lungo l'asse x, y e z che tengono conto dello strumento, della registrazione e della sottrazione tra superfici topografiche per D6

MODELLO AUTOMATICO (N(pt y)=1594)				
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %
Vtot D6	2,89E-02	8,76E-08	2,96E-04	1,02%

MODELLO PARAMETRICO (Punti Misurati MP=3001455)					
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %	u(V) [mm ³] valori singoli
Vtot D6	2,92E-02	6,64E-08	2,58E-04	0,88%	4,46E-01

Figura 6.22 Calcolo dell'incertezza tipo dei valori medi del volume del danno totale del D6 per il modello automatico (in alto) e modello parametrico (in basso)

La dispersione dei risultati è comparabile, in quanto in entrambi i casi l'incertezza tipo dei valori medi è dell'ordine del Decimillesimo di millimetro cubo.

Anche per questo caso studio si può notare che il modello parametrico è preferibile in termini di precisione, in quanto il rapporto tra lo standard error e la sua stima è inferiore all'1%, viceversa nel modello automatico l'incertezza relativa è dell'1.02%.

Le bande di incertezza dei due metodi si sovrappongono, pertanto, i risultati della caratterizzazione del volume di usura sono confrontabili se applicati a questa topografia, e non si può notare una differenza sistematica.

$E[V]/\text{mm}^3$	Vmin	V	Vmax
MM	2,83E-02	2,89E-02	2,95E-02
parametric	2,87E-02	2,92E-02	2,97E-02

Figura 6.23 calcolo dei limiti della stima intervallare del volume medio totale per il D6, sia per il metodo automatico che per il metodo parametrico

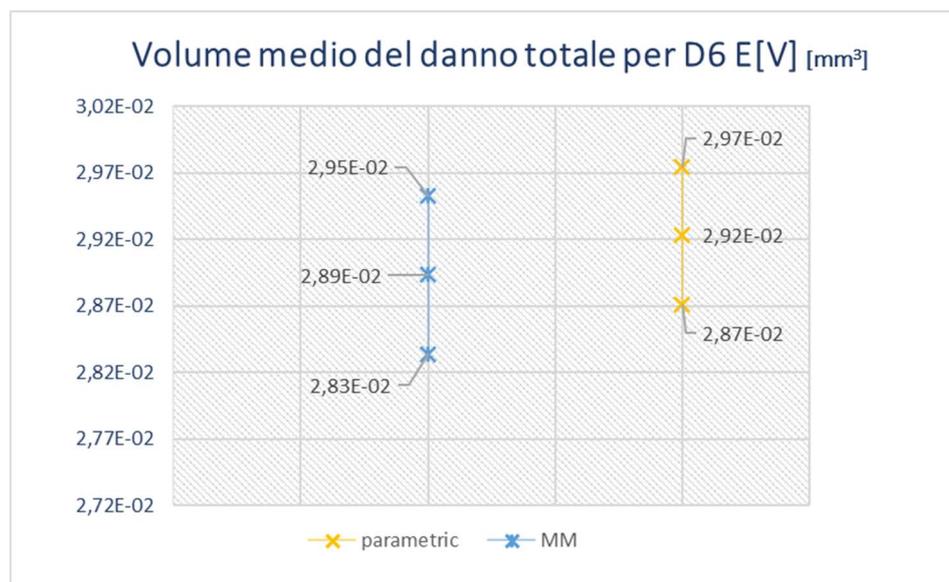


Figura 6.24 rappresentazione delle barre di incertezza e della stima del volume medio del danno totale per il D6 calcolate con il metodo parametrico (giallo) e automatico (blu). I valori sono calcolati con un livello di fiducia pari al 95% e 30 gradi di libertà

La stessa cosa può essere vista in modo più quantitativo facendo un t-test: assumendo come ipotesi nulla che la differenza delle medie delle due popolazioni sia zero, i risultati in figura 6.25 mostrano che l'ipotesi nulla non si può rifiutare con un rischio di prima specie del 5%.

Ma anche se dovessimo aumentare il rischio α al 10% per ridurre il rischio di seconda specie, l'ipotesi nulla comunque non si può rifiutare.

t-test	p=95%; 30 gdl	t-test	p=90%; 30 gdl
s^*	3,92E-04	s^*	3,92E-04
t_0	-0,76	t_0	-0,76
$t_{30;0,05/2}$	-2,04	$t_{30;0,05/2}$	-1,70
$t_{30;1-0,05/2}$	2,04	$t_{30;1-0,05/2}$	1,70
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA		NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	

Figura 6.25 esiti t-test sulla differenza delle medie tra i due metodi nel caso di un livello di fiducia $p=95\%$ (a sinistra) e un livello di fiducia $p=90\%$ (a destra)

6.1.3 DENTE11 (D11)

- Studiabile ROI_fixed_SURFICP D11

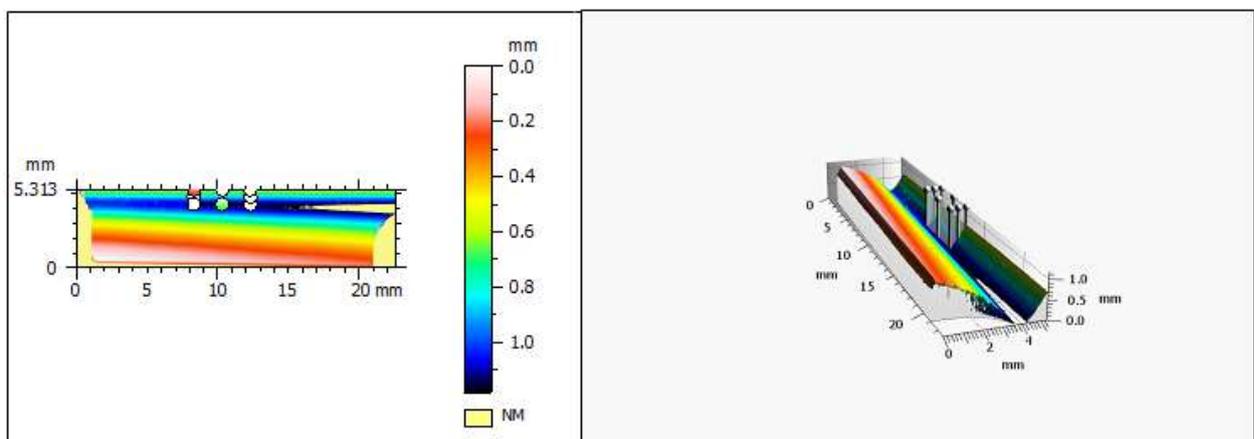


Figura 6.26 topografia del dente D11 pre-usura elaborata tramite MountainsMap. A sinistra vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra vista in 3D

- Studiabile ROI_moving_SURFICP D11

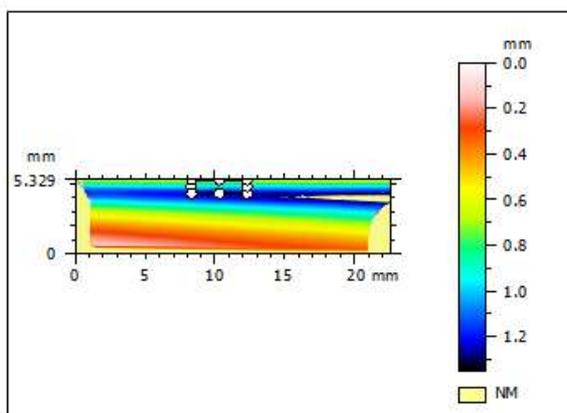


Figura 6.27 topografia del dente D11 post-usura elaborata tramite MountainsMap. Vista in 2D a colori in base alla quota lungo z

- Differenza post- e pre-usura D11 e rimozione della forma

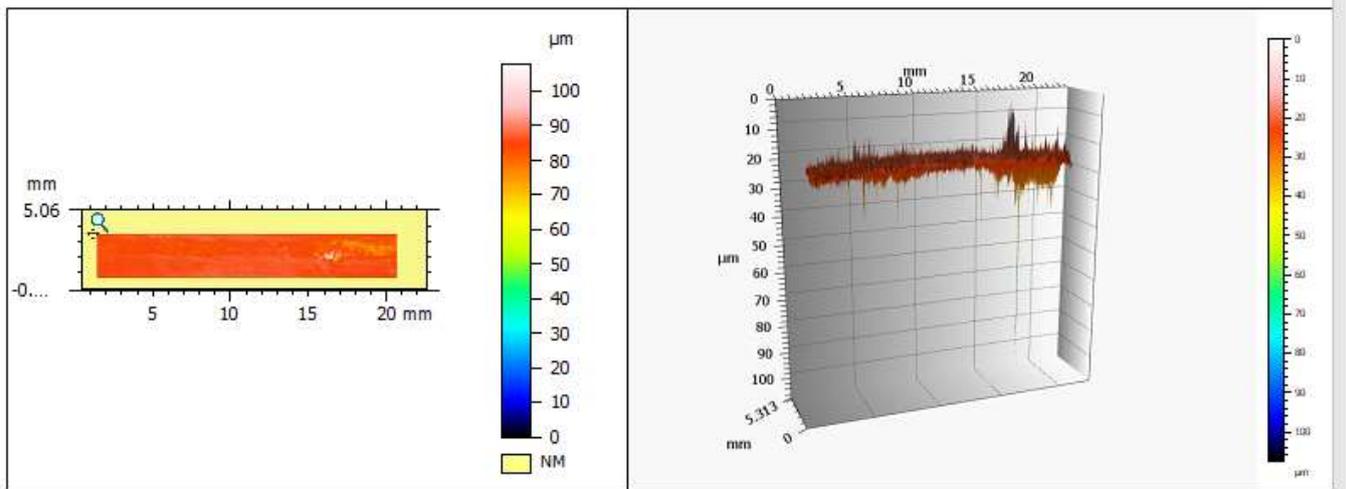


Figura 6.28 si ha il risultato della sottrazione delle topografie post-usura-pre-usura del Dentel1. A sinistra si ha la vista 2D del nuovo studiabile e a destra la vista 3D

Anche in questo caso è stata rimossa la forma, seppur è trascurabile: lo studiabile differenza mostra una curvatura di piccola entità.

- Studiabile finale D11 e caratterizzazione

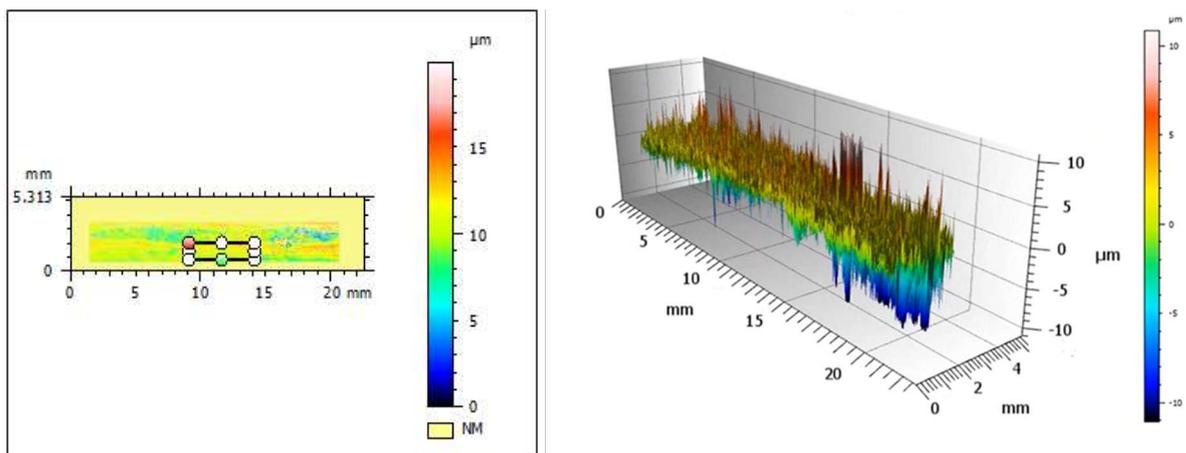


Figura 6.29 Danno da usura risultante D11 dopo aver rimosso gli errori di forma e gli outliers. A sinistra si ha una vista 2D dello studiabile mentre a destra una vista 3D

Identity card			
Name:	ROIMOVING_DENTE11 > Difference		
Studiabile type:	Surface		
Axis: X			
Length:	22.65	mm	
Size:	7153	points	
Spacing:	3.167	μm	
Offset:	0.0157	mm	
Axis: Y			
Length:	5.313	mm	
Size:	1688	points	
Spacing:	3.149	μm	
Offset:	-5.313	mm	
Axis: Z			
Layer type:	Topography		
Length:	19.92	μm	
Min:	-10.34	μm	
Max:	9.572	μm	
Size:	199166	digits	
Spacing:	0.1000	nm	
NM-points ratio:	67.78 % (8184052 Pts)		

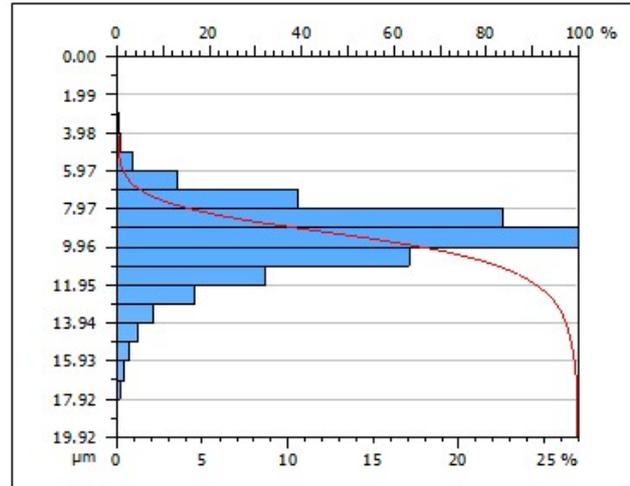


Figura 6.30 Carta d'identità dello studiabile finale del Dente11 (a sinistra); curva di Abbott-Firestone del volume d'usura totale del Dente11 (a destra)

Le immagini mostrano le caratteristiche dello studiabile finale del dente 11, la cui ampiezza è di circa 20 μm lungo l'asse z. E' riportata, inoltre, la sua distribuzione delle altezze e la relativa cumulata. Anche in questo caso è stata eseguita la caratterizzazione con i due metodi: Il piano di riferimento per la curva di Abbott è stato individuato in corrispondenza di un rapporto pari a 42,71% e una quota di circa 9,65 μm .

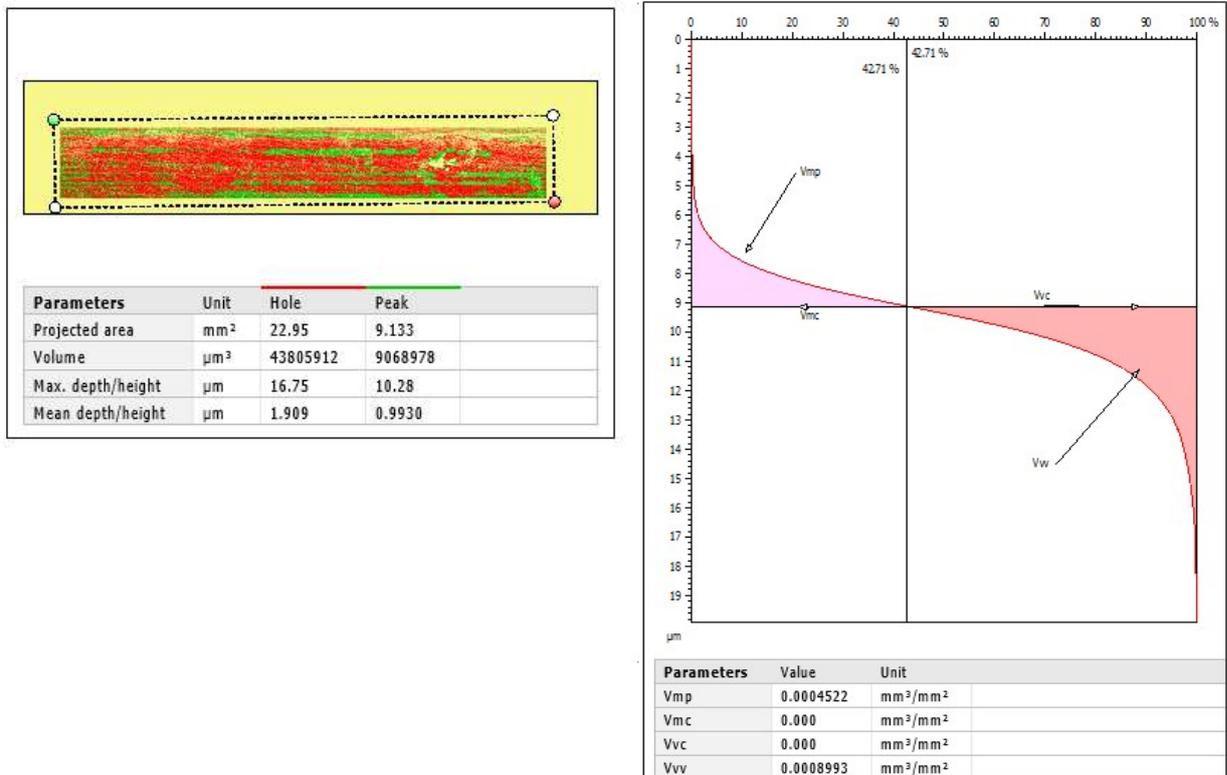


Figura 6.31 caratterizzazione del danno d'usura del Dente11 con il Metodo automatico attraverso MountainsMap (a sinistra); caratterizzazione del danno d'usura del Dente11 con il Metodo dei parametri volumetrici attraverso MountainsMap (a destra)

	Metodi topografici D11	
	Metodo automatico	Metodo parametrico
Area totale/mm ²	3,21E+01	3,94E+01
Volume materiale apportato/mm ³	9,07E-03	1,78E-02
Volume usura/mm ³	4,38E-02	3,55E-02
Volume del danno totale/mm ³	5,29E-02	5,33E-02

Figura 6.32 Confronti dei volumi d'usura, volume del galling e volume del danno totale calcolati con i due metodi per il Dente11

differenze assolute D11/mm ³	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00E+00	-4,23E-04
Metodo parametrico		0,00E+00

differenze percentuali D11	Metodo automatico	Metodo parametrico
Metodo automatico	0,00%	-0,80%
Metodo parametrico		0,00%

Figura 6.33 Differenze assolute (sopra) e differenze percentuali tra i due metodi nel calcolo dei volumi del danno totale per D11

Il danno totale calcolato col metodo automatico è di 5,29E-02 mm³ mentre col metodo dei parametri topografici è 5,33E-02 mm³. La differenza percentuale tra i due metodi del calcolo del volume del danno totale è del 0,80%, mentre la differenza assoluta è 4,23E-04 mm³.

La tabella mostra i contributi di incertezza calcolati per il dente11. L'ordine di grandezza dei valori si allinea a quelli degli altri due denti studiati.

Contributi registrazione e differenza topografie su z (D11)			
Contributi	Valore [nm]	asse	sorgente
uregx	504	x	Registrazione
uregy	497	y	Registrazione
uregz	791	z	Registrazione
u(x)	1038	x	strumento+registr
u(y)	1035	y	strumento+registr
u(z)	791	z	strumento+registr
upxl	638	x,y	Giusca

Figura 6.34 Contributi di incertezza tipo composta delle misure lungo l'asse x, y e z che tengono conto dello strumento, della registrazione e della sottrazione tra superfici topografiche per D11

L'incertezza dei valori medi del volume totale del danno, anche per il caso studio del dente 11, è stata calcolata per i due metodi di caratterizzazione come segue.

MODELLO AUTOMATICO (N(pt y)=1688)				
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %
Vtot D11	5,29E-02	2,76E-07	5,26E-04	0,99%

MODELLO PARAMETRICO (Punti Misurati MP=3954321)					
Contributo	Valore [mm ³]	u(E[V]) ² [mm ⁶]	u(E[V]) [mm ³]	incertezza relativa %	u(V) [mm ³] valori singoli
Vtot D11	5,32E-02	2,65E-08	1,63E-04	0,31%	3,24E-01

Figura 6.35 Calcolo dell'incertezza tipo dei valori medi del volume del danno totale del D11 per il modello automatico (in alto) e modello parametrico (in basso)

L'ordine di grandezza dello scarto tipo dei valori medi è comparabile e pari al decimo di micrometro cubo. Ancora una volta il modello parametrico ha un'incertezza relativa più bassa pari allo 0.31% e quindi è più preciso, mentre il modello automatico ha una dispersione relativa del 1%.

Come per il dente6 le stime intervallari dei valori medi si sovrappongono, mostrando qualitativamente che non vi è differenza sistematica nel caratterizzare il volume del danno totale con i due metodi applicati sulla topografia del dente 11.

E[V]/mm ³	Vmin	V	Vmax
MM	5,18E-02	5,29E-02	5,39E-02
parametric	5,29E-02	5,32E-02	5,35E-02

Figura 6.36 calcolo dei limiti della stima intervallare del volume medio totale per il D11, sia per il metodo automatico che per il metodo parametrico

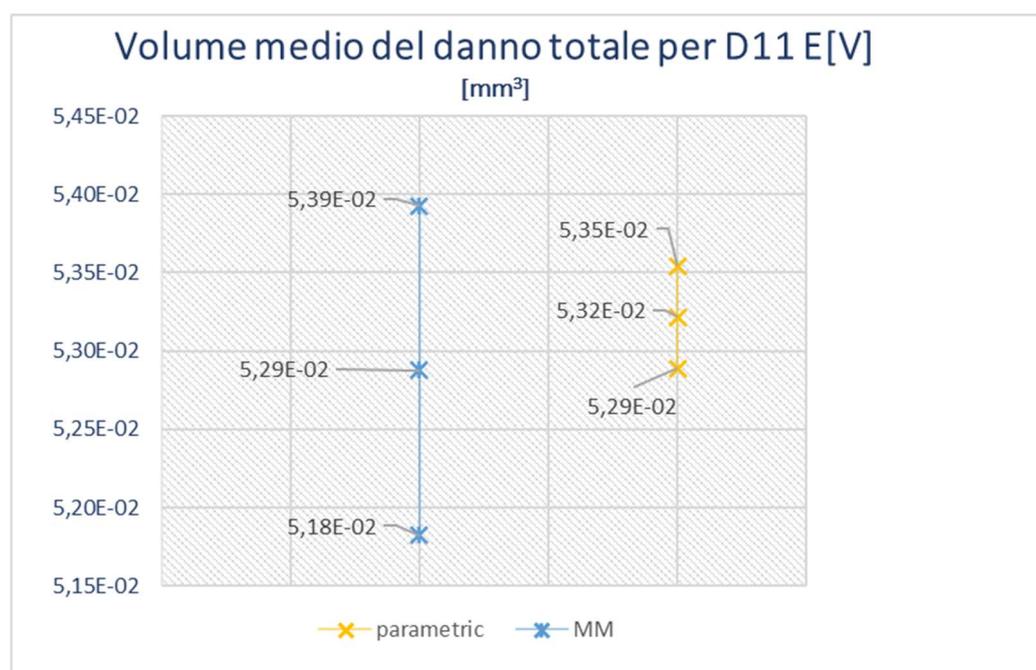


Figura 6.37 rappresentazione delle barre di incertezza e della stima del volume medio del danno totale per il D11 calcolate con il metodo parametrico (giallo) e automatico (blu). I valori sono calcolati con un livello di fiducia pari al 95% e 30 gradi di libertà

Lo stesso concetto è confermato con un approccio più quantitativo. Il test-t mostra una statistica test prossima allo zero, pertanto, è inclusa nell'intervallo dei quantili della distribuzione di Student calcolati al 95% ma anche al 90%.

t-test	p=95%; 30 gdl	t-test	p=90%; 30 gdl
s*	5,50E-04	s*	5,50E-04
t ₀	-0,62	t ₀	-0,62
t _{30;0,05/2}	-2,04	t _{30;0,05/2}	-1,70
t _{30;1-0,05/2}	2,04	t _{30;1-0,05/2}	1,70
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA		NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	

Figura 6.38 esiti t-test sulla differenza delle medie tra i due metodi nel caso di un livello di fiducia p=95% (a sinistra) e un livello di fiducia p=90% (a destra)

Quindi l'ipotesi nulla non può essere rifiutata, sia nel caso di una significatività del 5% ma anche superiore.

Come per il dente6, anche questo caso studio mostra l'indifferenza nell'utilizzare i due metodi per caratterizzare il volume di usura, nonostante il metodo parametrico si conferma essere il più preciso nel calcolo, seppur un po' più complicato da implementare al livello computazionale.

6.2 Caso studio 2: Caratterizzazione usura provino piano SiC-Al

- Studiabili delle ROI pre- e post-usura registrati con ICP

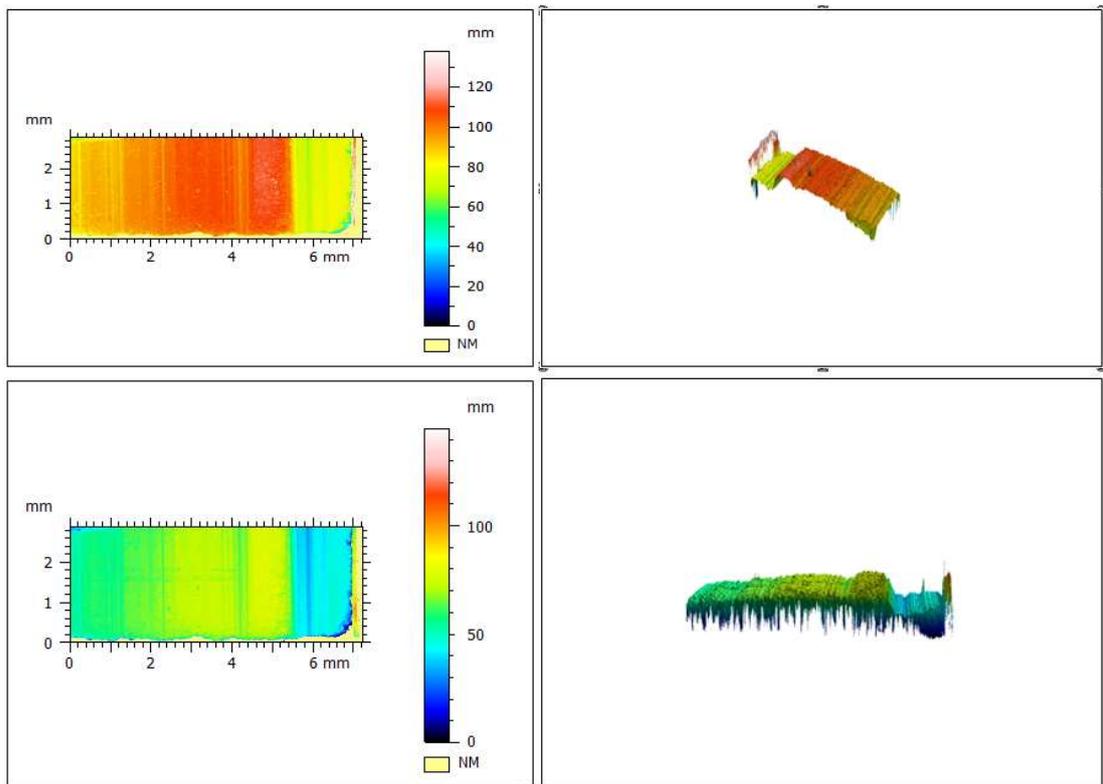


Figura 6.39 topografia del composito SiC-Al pre-usura (in alto) e post-usura registrata mediante ICP (in basso) elaborata tramite MountainsMap. In entrambi i casi, a sinistra si ha una vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra una vista in 3D

- Studiabili delle ROI pre- e post-usura registrati con SURF-ICP

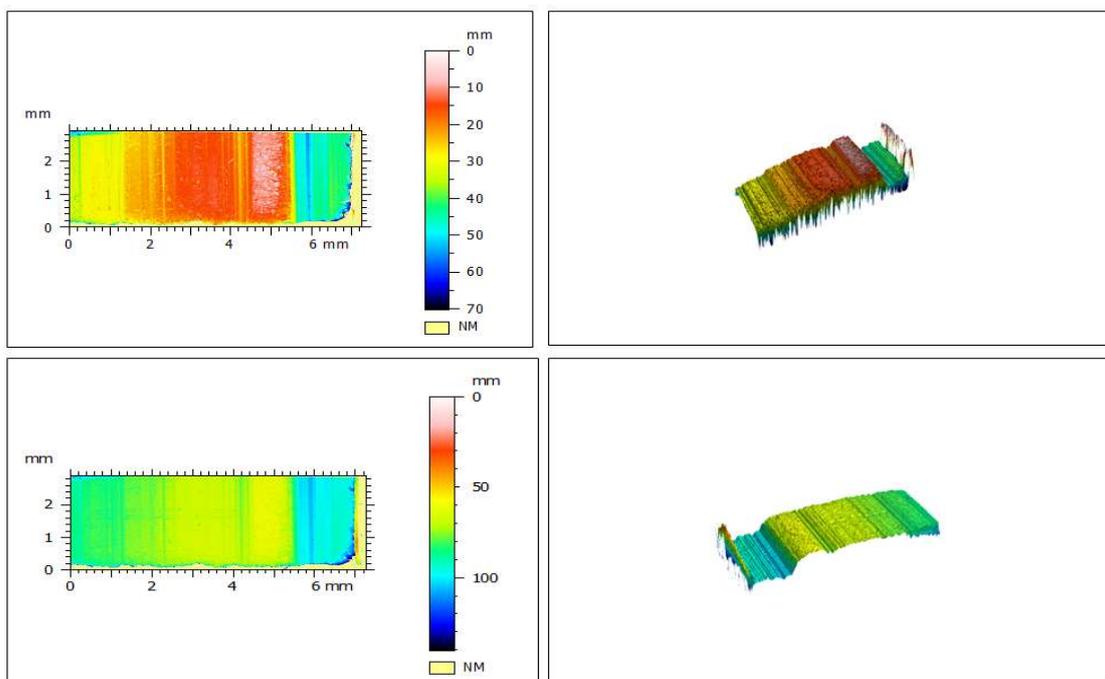


Figura 6.40 topografia del composito SiC-Al pre-usura (in alto) e post-usura registrata mediante SURF+ICP (in basso) elaborata tramite MountainsMap. In entrambi i casi, a sinistra si ha una vista in 2D a colori in base alla quota lungo z, a destra una vista in 3D

Analisi in Batch

L'analisi per la caratterizzazione del volume di usura è stata effettuata in *batch*, ovvero sono stati applicati esattamente gli stessi operatori in parallelo sia allo studiabile registrato con ICP tradizionale, sia per quello registrato con SURF+ICP. Questo ha permesso di avere due *workflow* esattamente identici e di standardizzare quelle operazioni strettamente manuali, come l'estrazione di una regione di interesse, la cui discrezionalità è elevata, aumentando la confrontabilità. Seguono i risultati dei due flussi di lavoro; in particolare per convenzione, le immagini e le tabelle sulla parte sinistra della pagina si riferiscono allo studiabile registrato con semplice ICP, mentre quelle corrispondenti a destra si riferiscono alle registrazioni mediante SURF+ICP.

- Studiabile differenza ed estrazione Area della traccia di usura.

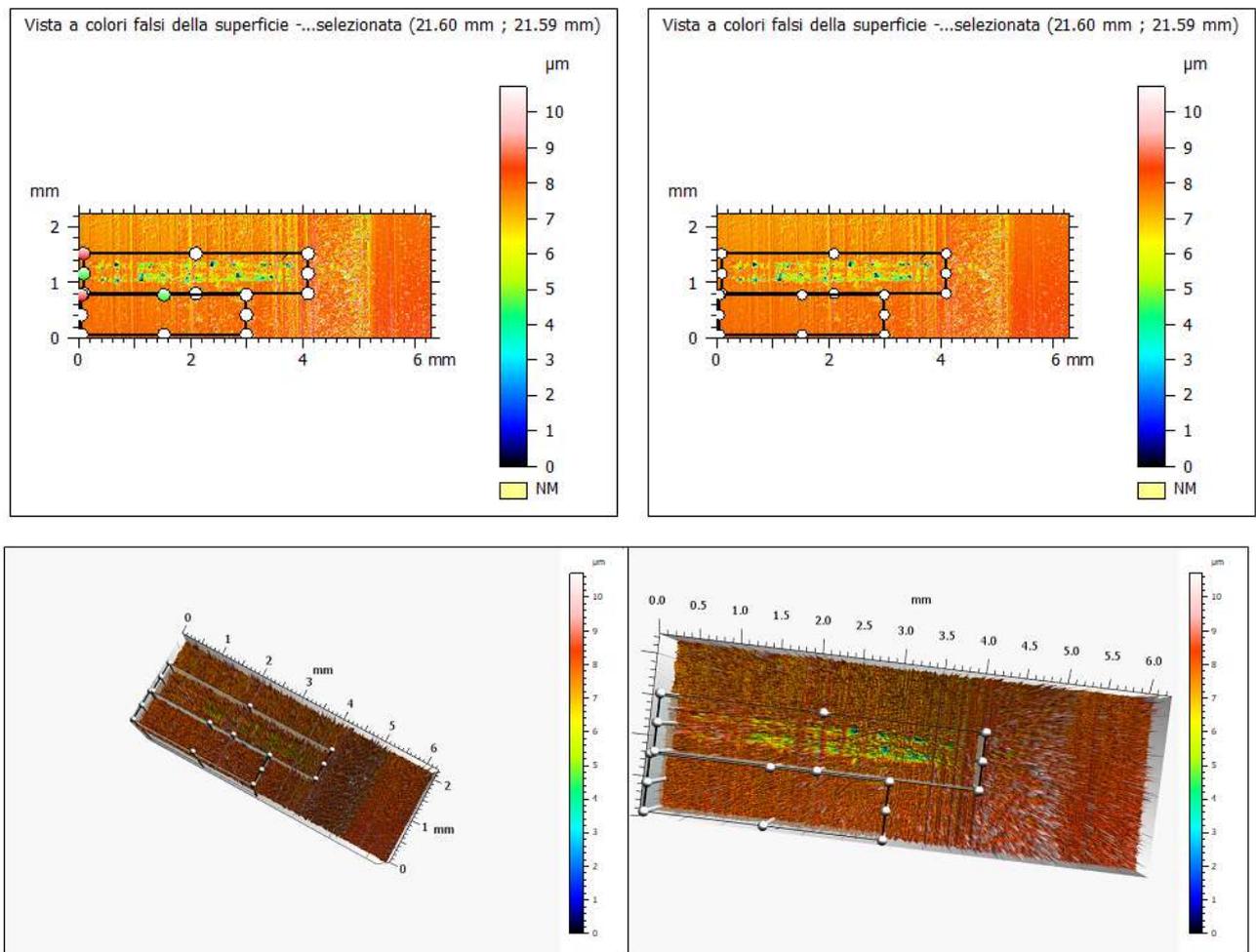


Figura 6.41 si ha il risultato della sottrazione delle topografie post-usura-pre-usura del SiC-Al. A sinistra si ha la topografia nel caso di registrazione ICP, mentre a destra nel caso di registrazione Surf +Icp. In alto è riportata la vista 2D del nuovo studiabile, mentre in basso quella 3D. Si nota l'estrazione manuale in batch dell'area della pista d'usura

La vista a colori a falsi della superficie e la relativa vista in 3D dello studiabile 'differenza', mostra chiaramente la traccia di usura del tribo-test lineare. Pertanto, è stata estratta un'area circostante per procedere con la caratterizzazione del volume della zona di interesse. Le immagini mostrano l'estrazione di un'ulteriore area nella zona di superficie indeformata, la quale, secondo quanto già esposto in 'Materiali e Metodi' è stata utilizzata per il calcolo del RMSE della registrazione lungo z.

- Studiabile finale e caratterizzazione del volume di usura

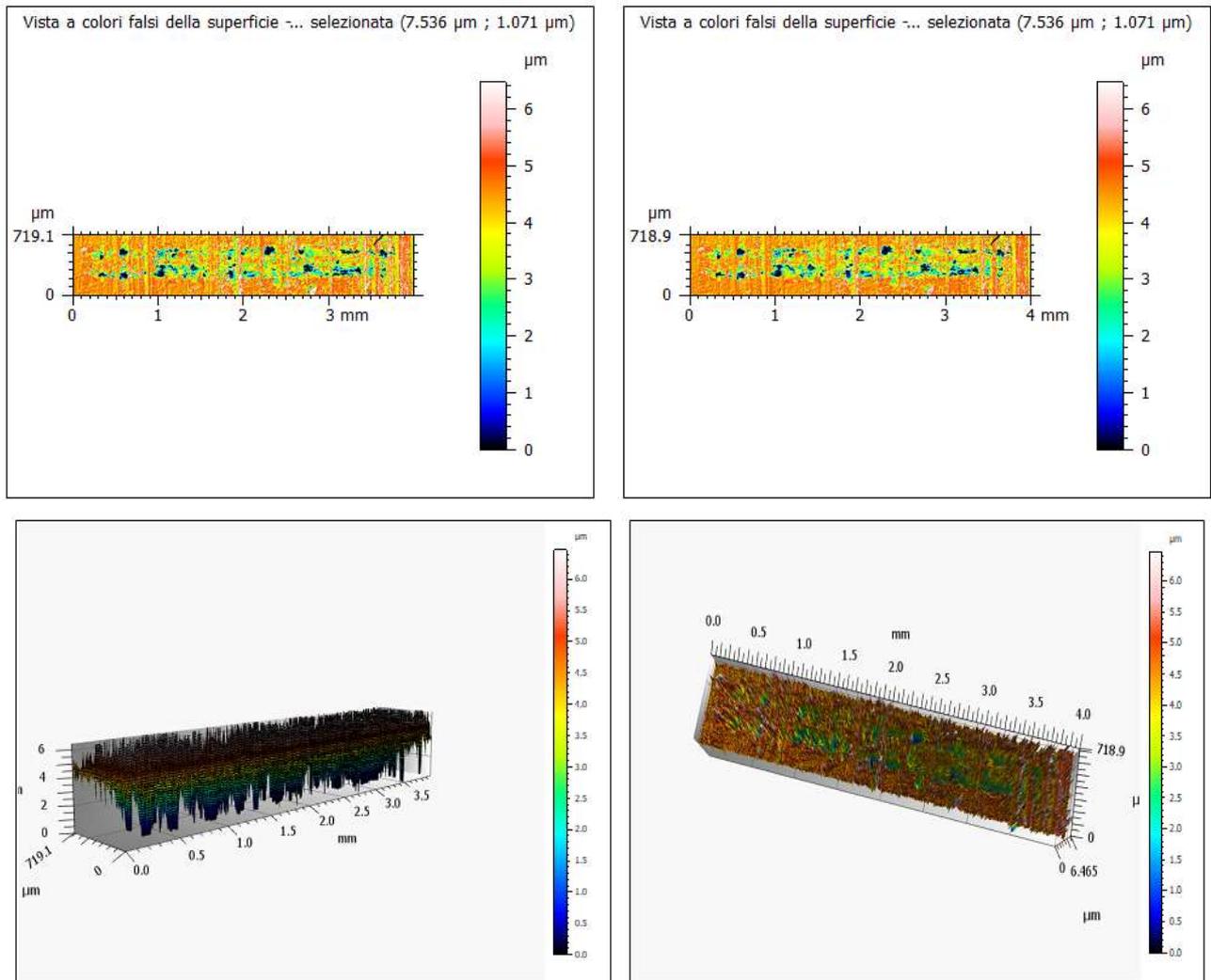


Figura 6.42 Danno da usura risultante del SiC-Al dopo aver rimosso gli errori di forma e gli outliers. In alto a sinistra si ha la registrazione Icp mentre a destra Surf+ Icp. In basso si hanno le viste rispettive 3D

Compatibilmente con quanto atteso, lo studiabile finale ha una lunghezza lungo l'asse x pari a 4 mm che è la stessa della pista settata durante la prova; l'escursione di entrambi gli studiabili è di circa 6 micron lungo l'asse z e la topografia risulta essere piuttosto regolare con una dispersione delle altezze simile lungo x.

Lo studiabile finale, le cui caratteristiche sono descritte nella carta d'identità, è stato oggetto di caratterizzazione con i metodi topografici. È stata effettuata l'individuazione del piano indeformato in entrambi i casi studio: nel caso di registrazione con ICP le coordinate sono 1,95 μm e 38,30% di rapporto superficiale; nel caso di registrazione con SURF+ICP, invece, le coordinate sono a 2,06 μm e 45,44% di rapporto superficiale.

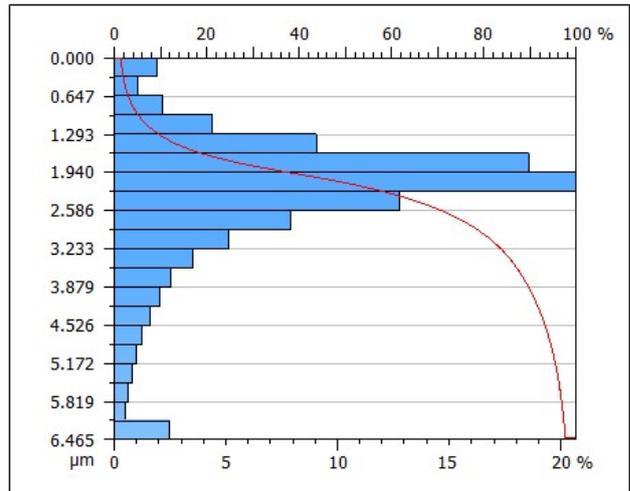
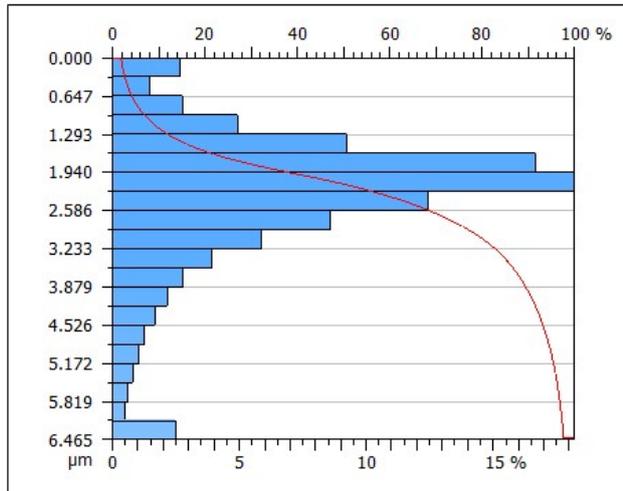


Figura 6.43 curva di Abbott-Firestone del volume d'usura totale del SiC-Al, registrato con ICP (a sinistra) e Surf + Icp (a destra)

Carta d'identità			
Nome:	diff_ICP > Area estratta > Soglia selezionata (21.60)		
Tipo di studiabile:	Superficie		
Asse:	X		
Lunghezza:	4.000	mm	
Dimensione:	2509	punti	
Spaziatura:	1.595	µm	
Offset:	2.504	mm	
Asse:	Y		
Lunghezza:	719.1	µm	
Dimensione:	461	punti	
Spaziatura:	1.563	µm	
Offset:	-2353	µm	
Asse:	Z		
Tipo di strato:	Topografia		
Lunghezza:	6.465	µm	
Min:	-5.627	µm	
Max:	0.8384	µm	
Dimensione:	80588	Cifre	
Spaziatura:	0.08023	nm	

Carta d'identità			
Nome:	diff_SURFICP > Area estratta > Soglia selezionata		
Tipo di studiabile:	Superficie		
Asse:	X		
Lunghezza:	4.001	mm	
Dimensione:	2510	punti	
Spaziatura:	1.595	µm	
Offset:	2.504	mm	
Asse:	Y		
Lunghezza:	718.9	µm	
Dimensione:	461	punti	
Spaziatura:	1.563	µm	
Offset:	-2357	µm	
Asse:	Z		
Tipo di strato:	Topografia		
Lunghezza:	6.465	µm	
Min:	-5.382	µm	
Max:	1.084	µm	
Dimensione:	80588	Cifre	
Spaziatura:	0.08023	nm	

Figura 6.44 carta d'identità del volume d'usura totale del SiC-Al, registrato con ICP (a sinistra) e Surf + Icp (a destra)



Figura 6.45 Caratterizzazione del volume d'usura mediante il metodo automatico di MountainsMap. A sinistra i risultati si riferiscono allo studiabile registrato con ICP, a destra con Surf+Icp

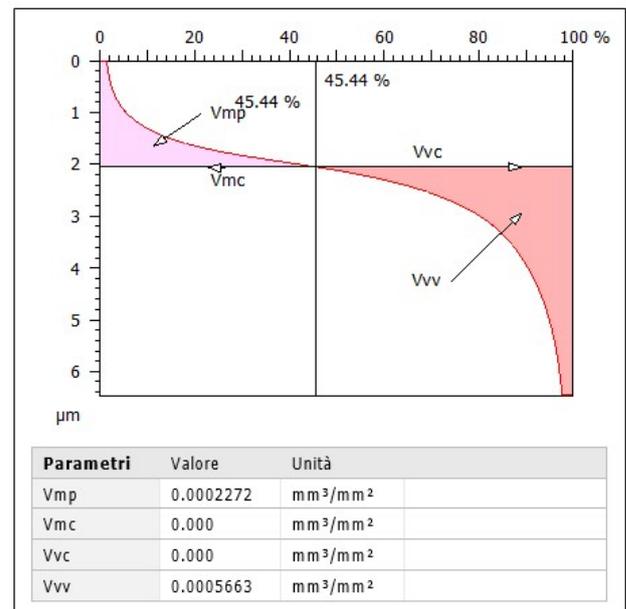
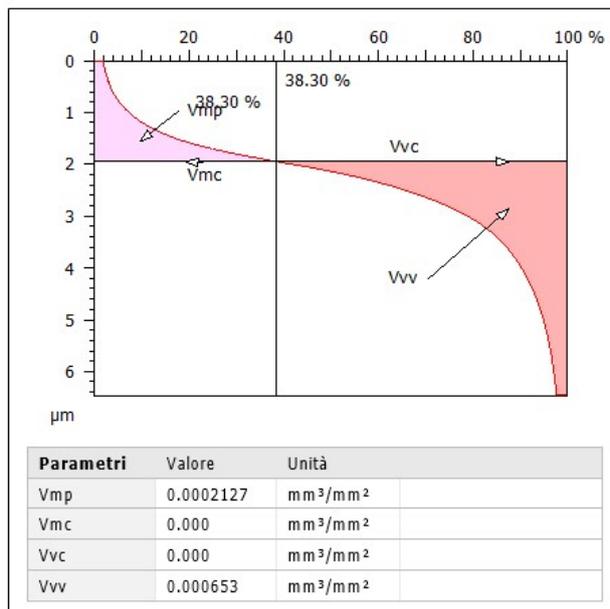


Figura 6.46 Caratterizzazione del volume d'usura mediante il metodo dei parametri topografici di MountainsMap. A sinistra i risultati si riferiscono allo studiabile registrato con ICP, a destra con Surf+Icp

SiC-AI	Metodi topografici: registrazione ICP		Metodi topografici: registrazione SURF+ICP	
	Metodo automatico	Metodo parametrico	Metodo automatico	Metodo parametrico
Area totale/ mm^2	2,59E+00	2,88E+00	2,63E+00	2,88E+00
Volume materiale apportato/ mm^3	1,18E-03	6,13E-04	9,30E-04	6,55E-04
Volume usura/ mm^3	1,24E-03	1,88E-03	1,34E-03	1,63E-03
Volume del danno totale/ mm^3	2,41E-03	2,50E-03	2,27E-03	2,29E-03
Differenze % Volume totale	-3,52%		-0,68%	

Figura 6.47 La tabella mostra i confronti del volume d'usura, galling e danno totale nel caso dei due metodi topografici (con le relative differenze percentuali) per ogni procedura di registrazione analizzata

La Figura 6.47 permette di confrontare i risultati a parità di unità di misura per entrambe le registrazioni.

In particolare, il volume del danno totale medio nel caso ICP risulta essere $2,41E-03 \text{ mm}^3$ calcolato col metodo automatico, mentre $2,50E-03 \text{ mm}^3$ calcolato col metodo parametrico. La differenza percentuale è del 3,52%. La differenza percentuale si riduce notevolmente con la registrazione SURF+ICP ed è pari al 0,68%. In questo secondo caso il volume del danno totale medio stimato è $2,27E-03 \text{ mm}^3$ col metodo di MountainsMap, mentre è di $2,29E-03 \text{ mm}^3$ col metodo di Abbott. Indipendentemente dal tipo di registrazione l'ordine di grandezza del volume stimato è sempre lo stesso e pari a $10^{(-3)} \text{ mm}^3$.

La Figura 6.48 mostra i contributi di incertezza legati alla registrazione e la differenza delle topografie lungo z, che si aggiungono a quelli costanti dello strumento ottico topografico.

Contributi registrazione e differenza topografie su z SiC-AI				
Metodi	ICP	SURF+ICP		
Contributi	Valore [nm]	Valore [nm]	asse	sorgente
uregx	288	288	x	Registrazione
uregy	116	116	y	Registrazione
uregz	531	440	z	Registrazione
u(x)	952	952	x	strumento+registr
u(y)	915	915	y	strumento+registr
u(z)	531	440	z	strumento+registr
upxl	638	638	x,y	Giusca

Figura 6.48 Contributi di incertezza tipo composta delle misure lungo l'asse x, y e z che tengono conto dello strumento, della registrazione e della sottrazione tra superfici topografiche per il SiC-AI, registrato sia mediante Icp che Surf+Icp.

I contributi di incertezza per entrambe le registrazioni hanno lo stesso ordine di grandezza cioè dell'ordine del decimo del μm . Si può notare, però, che la registrazione mediante preliminari algoritmi di *features recognition*, ha un'incertezza lievemente inferiore lungo z, che si propaga nel calcolo totale dell'incertezza della misura lungo la coordinata z, migliorandone leggermente le performance metrologica.

Il calcolo dell'incertezza è stato eseguito per entrambe le registrazioni sia per il modello automatico, che per il modello dei parametri volumetrici, secondo il framework già descritto nel capitolo 4 come mostrato nelle tabelle seguenti. I risultati si riferiscono, in particolare, al calcolo dell'incertezza del volume totale medio, eseguito sfruttando la varianza della media campionaria, data la rispettiva numerosità dei campioni N e MP indicata.

MODELLO AUTOMATICO (N(pt y)=461)				
Contributo	Valore [mm³]	u(E[V])² [mm⁶]	u(E[V]) [mm³]	incertezza relativa %
Vtot ICP	2,41E-03	2,12E-09	4,60E-05	1,91%
Vtot SURF+ICP	2,27E-03	1,88E-09	4,34E-05	1,91%

MODELLO PARAMETRICO					
Contributo	Valore [mm³]	u(E[V])² [mm⁶]	u(E[V]) [mm³]	incertezza relativa %	Punti Misurati MP
Vtot ICP	2,49E-03	2,63E-10	1,62E-05	0,65%	1156649
Vtot SURF+ICP	2,29E-03	2,29E-10	1,51E-05	0,66%	1157110

Figura 6.49 Calcolo dell'incertezza tipo dei valori medi del volume del danno totale del SiC-AI per il modello automatico per entrambe le registrazioni (in alto) e modello parametrico (in basso)

Si può subito notare che la modalità di registrazione **non impatta sull'incertezza relativa**, che è del 2% per i modelli automatici, mentre del 0,65% circa nei modelli parametrici. L'incertezza dei valori medi è dell'ordine di 10^{-5} mm^3 , ma compatibilmente all'altro caso studio, si può notare che i modelli parametrici hanno una precisione superiore.

Il grafico mostra le barre d'incertezza del volume del danno totale medio ricavato sia con il metodo parametrico che con il metodo automatico, mediante registrazione ICP e SURF+ICP. Nell'ambito della medesima procedura di registrazione le stime intervallari calcolate con un livello di fiducia del 95% e 30 gradi di libertà si sovrappongono; ciò significa che sia il metodo automatico che il metodo parametrico non mostrano differenze sistematiche nell'ambito della medesima procedura di

$E[V]/\text{mm}^3$	Vmin	V	Vmax
MM ICP	2,32E-03	2,41E-03	2,50E-03
parametric ICP	2,46E-03	2,49E-03	2,53E-03
MM SURF-ICP	2,19E-03	2,27E-03	2,36E-03
parametric SURF-ICP	2,26E-03	2,29E-03	2,32E-03

Figura 6.50 calcolo dei limiti della stima intervallare del volume medio totale per il SiC-Al, nel caso di metodo automatico Icp, metodo parametrico Icp, metodo automatico Surf+Icp e metodo parametrico Surf+Icp

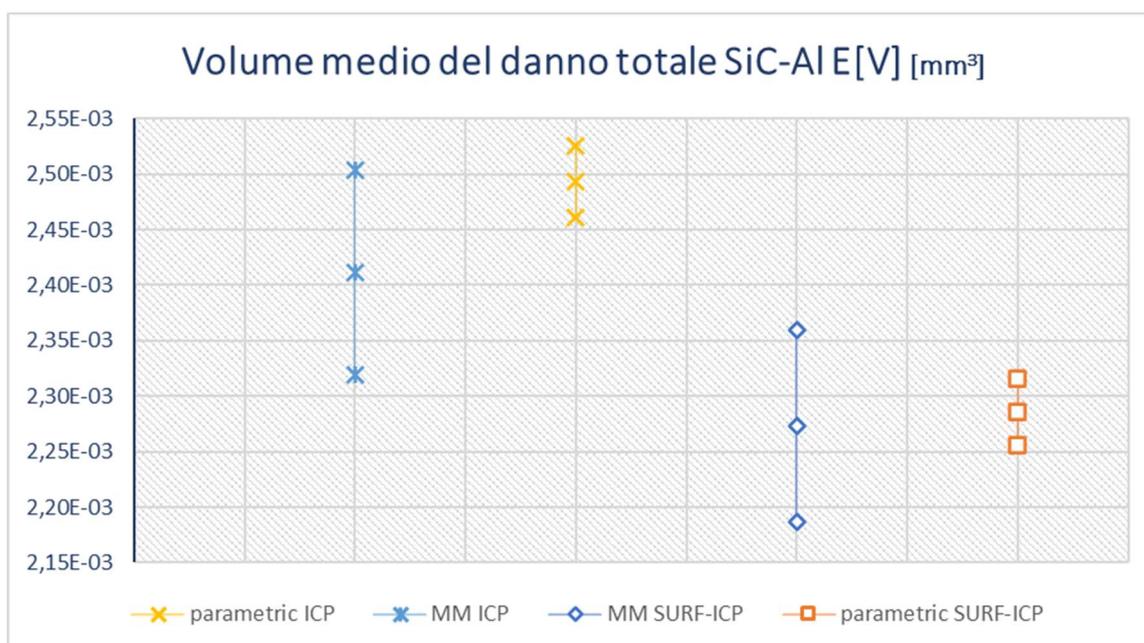


Figura 6.51 rappresentazione delle barre di incertezza e della stima del volume medio del danno totale per il SiC-Al calcolate per il metodo parametrico (giallo) e automatico (blu con le croci) nel caso di registrazione Icp e calcolate per il metodo parametrico (arancio) e automatico (blu con i pallini) nel caso di registrazione Surf+Icp. I valori sono calcolati con un livello di fiducia pari al 95% e 30 gradi di libertà

registrazione, pertanto non si può rifiutare l'ipotesi nulla che il volume del danno totale medio calcolato col metodo automatico e col metodo parametrico sia uguale nell'ambito della medesima procedura di registrazione, con un livello di significatività del 5%. Il t-test sulla differenza delle medie conferma i risultati qualitativi.

t-test ICP	p=95%; 30 gdl
s*	4,88E-05
t ₀	-1,68
t _{30;0,05/2}	-2,04
t _{30;1-0,05/2}	2,04
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	
t-test SURF-ICP	p=95%; 30 gdl
s*	4,59E-05
t ₀	-0,28
t _{30;0,05/2}	-2,04
t _{30;1-0,05/2}	2,04
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	

Figura 6.52 esiti t-test sulla differenza delle medie tra i metodi automatico e parametrico nel caso di un livello di fiducia p=95% nell'ambito della medesima procedura di registrazione (in alto Icp, in basso Surf+Icp)

Come per il caso dei denti dell'albero scanalato, è evidente che il metodo parametrico si conferma essere più preciso in quanto l'incertezza relativa è inferiore e di circa 0,65% mentre l'incertezza relativa del metodo automatico è di circa il 2%. Quindi, confrontando la stima del volume del danno totale medio solo dei metodi parametrici rispettivamente ICP e SURF+ICP, si può invece rilevare una differenza sistematica tra i due calcoli in quanto le stime intervallari non si sovrappongono. Pertanto, il metodo di registrazione impatta sulla caratterizzazione del volume, soprattutto considerando quella ottenuta col metodo parametrico. Il t-test porta a rifiutare l'ipotesi nulla con un 5% di rischio di prima specie, ma la statistica test è tale che, anche diminuendo l'errore di prima specie all' 1% ad esempio, l'ipotesi nulla è rifiutata.

t-test	p=95%; 30 gdl
s*	2,22E-05
t ₀	9,35
t _{30;0,05/2}	-2,04
t _{30;1-0,05/2}	2,04
RIFIUTO IPOTESI NULLA	

Figura 6.53 esiti t-test sulla differenza delle medie tra il metodo parametrico Icp e il metodo parametrico Surf+Icp

Visto che la teoria di Takimoto, Besl e altri, ci assicura che, facendo una caratterizzazione preliminare col metodo Surf, i risultati sono migliori, sappiamo già che i risultati di riferimento sono quelli ottenuti mediante una registrazione SURF+ICP (12).

Questo è comprovato in modo sperimentale dai risultati dai quali emerge che l'accuratezza, ossia la differenza delle medie tra le coppie di grafici rappresentati (modello automatico e parametrico), è migliore, quindi minore, nel caso della registrazione SURF+ICP. La differenza percentuale stimata dei volumi medi calcolati (automatico meno parametrico) è del -3,52% per la registrazione ICP, mentre del -0,68% per la registrazione SURF+ICP e quindi minore.

Questo a controprova del fatto che, applicando l'algoritmo di *features recognition*, i due metodi di analisi numerica sono più simili, in quanto la superficie su cui lavoriamo è migliore, ossia la differenza è migliorata.

Statisticamente si può vedere questo concetto riprendendo i t-test sopra analizzati ma con un livello di fiducia inferiore, ovvero un rischio di errore α superiore pari al 10%.

t-test ICP	p=90%; 30 gdl
s*	4,88E-05
t ₀	-1,68
t _{30;0,10/2}	-1,70
t _{30;1-0,10/2}	1,70
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	
t-test SURF-ICP	p=90%; 30 gdl
s*	4,59E-05
t ₀	-0,28
t _{30;0,10/2}	-1,70
t _{30;1-0,10/2}	1,70
NON RIFIUTO IPOTESI NULLA	

Figura 6.54 esiti t-test sulla differenza delle medie tra i metodi automatico e parametrico nel caso di un livello di fiducia p=90% nell'ambito della medesima procedura di registrazione (in alto Icp, in basso Surf+Icp)

Entrambe le ipotesi nulle non possono essere rifiutate, ma si vede come la statistica test nel caso della registrazione ICP è a cavallo della soglia limite inferiore che discrimina il non rifiuto o il rifiuto dell'ipotesi nulla. Viceversa, nel caso della registrazione SURF+ICP la statistica test è ben lontano dalle soglie di rifiuto. Pertanto, un aumento marginale della significatività del test porterebbe nel primo caso al rifiuto dell'ipotesi nulla e quindi una differenza sistematica tra i due metodi di caratterizzazione legata ad una registrazione più grossolana delle superfici differenza. Ribaltando la prospettiva dal test agli intervalli fiduciali, una stima intervallare meno ampia (un livello di fiducia inferiore del 90%) delle differenze delle medie, nel primo caso non conterrebbe il valore zero di differenza, mentre nel secondo caso conterrebbe la differenza nulla tra i valori medi del metodo automatico e parametrico.

Da quest'analisi si può concludere che è necessario usare gli algoritmi di registrazione proposti dalla letteratura soprattutto nel caso in cui le analisi numeriche di caratterizzazione del volume vengano fatte col metodo parametrico, che è il più preciso, ovvero presenta incertezze inferiori nei risultati.

7 Conclusioni

Questo lavoro ha affrontato la sfida della misurazione dell'usura nel test tribologico Pin-on-Disc e in uno specifico banco prova per la valutazione del danno da *fretting* sui denti di un albero scanalato. Per questo scopo è stato necessario effettuare la valutazione non con i metodi tradizionali standard basati sulla profilometria superficiale ma con i metodi già disponibili in ambito scientifico basati sulla misurazione della topografia superficiale, in quanto è stato già dimostrato che gli approcci basati sulla topografia per caratterizzare il volume dei danni da usura sono migliori per prestazioni metrologiche e robustezza. Sono dunque indispensabili in applicazioni dove è necessario misurare volumi di usura molto bassi come nel caso dei compositi con rinforzi in ceramica oppure nel caso del danno da *fretting* negli accoppiamenti che, per definizione del fenomeno, si verifica con oscillazioni di piccola ampiezza. Quindi la descrizione del fenomeno risulta essere più completa e precisa con i metodi topografici, soprattutto per l'elevato numero di punti sperimentali campionati che garantiscono la rappresentatività della topografia misurata, siano essi profili estratti o punti misurati.

Per confrontare i metodi correttamente sono state riportate le performance in termini di misura dell'incertezza secondo il framework teorico della letteratura più recente. Pertanto, nel lavoro è stata ricostruita la procedura della valutazione delle incertezze di misura del metodo automatico e parametrico, basata sul quadro standardizzato delle caratteristiche metrologiche degli strumenti di misura topografici come il CSI, e sugli errori relativi all'implementazione degli algoritmi di registrazione delle superfici.

Il quadro teorico è stato quindi sfruttato per confrontare i metodi e gli algoritmi di Computer Vision disponibili in due applicazioni sperimentali di interesse industriale.

Nel caso studio della caratterizzazione dei denti dello scanalato l'algoritmo di registrazione utilizzato è sempre stato il medesimo (ICP); l'eliminazione di questo grado di libertà, seppur necessario per la forma non piana delle evolventi dei denti, ha permesso di valutare un aspetto specifico che impatta sulla caratterizzazione del volume di usura mediante il metodo di MountainsMap e di Abbott-Firestone: *la topografia*.

Infatti, la topografia degli studiabili influisce sulle performance dell'applicazione dei due metodi per caratterizzare il volume di usura. L'usura distribuita su tutta la superficie dell'evolvente è la prima causa di questo. L'usura distribuita da *fretting*, infatti, rende impossibile localizzare l'area di caratterizzazione in un intorno della traccia di usura, come nel caso del tribo-test lineare. Affinché la valutazione sia rappresentativa del fenomeno, infatti, è necessario estrarre come regione di interesse tutta la parte del dente che ingrana, aumentando così la porzione di superficie su cui vengono fatte le elaborazioni. Il software, però, nell'effettuare le operazioni sulle topografie soffre molto la presenza di vari artefatti; infatti, è molto sensibile alle irregolarità di varia natura dei dati, come gli spikes residui, rumore non filtrato, errori di lettura come i punti classificati 'non misurati'. Pertanto, per quanto viene fatto in modo accurato il pre-processing iniziale delle nuvole di punti, un'area di valutazione estesa e non localizzata aumenta la probabilità di questi disturbi che impattano sulle misure. Ma non solo, anche la presenza di una forte eteroschedasticità lungo x della distribuzione delle altezze, con zone localizzate dove le altezze sono molto disperse, magari per un fenomeno di usura particolarmente severo, impatta fortemente sulla performance dei metodi e sulla loro incertezza. Questo è particolarmente evidente nel Dente1 dove la vista della topografia in 3D ha mostrato la presenza di una forte dispersione dei picchi e delle valli localizzata lungo un certo

intervallo delle x e y (vicino l'origine del sistema di riferimento); questa forte dispersione delle altezze impatta soprattutto sul calcolo del metodo automatico e sulla sua incertezza; non a caso la caratterizzazione del volume di usura con i due metodi è significativamente differente, in antitesi alle previsioni e ai risultati mostrati dal Dente6 e Dente 11, i quali forniscono output molto simili nell'applicazione dei metodi. La giustificazione di questo si trova nella definizione analitica dei metodi; infatti, nel caratterizzare il volume, il metodo automatico campiona dei profili dei quali calcola le superfici, perciò tanto più alto è il valore della superficie, perché la topografia è complessa, tanto più alto è il valore del volume d'usura; non a caso per il Dente1 la differenza percentuale del volume di usura tra i due metodi è superiore rispetto agli altri denti, e di segno inverso; Il modello di Abbott fa un calcolo totalmente diverso, che non si basa sulla valutazione delle superfici, ma dipende dalle quote e la loro relativa cumulata (il rapporto superficiale e il suo integrale), perciò Abbott-Firestone è meno sensibile alla topografia.

Inoltre, il valore elevato della superficie dei profili campionati aumenta anche l'incertezza della misura del modello di MountainsMap: il calcolo dell'incertezza è funzione dell'incertezza delle superfici dei profili, che a sua volta è direttamente proporzionale al valore della superficie. Tanto più alto il valore della superficie, quindi, tanto più alta è anche l'incertezza calcolata col metodo automatico. Viceversa, l'incertezza del metodo dei parametri volumetrici è legata ad altri fattori come già visto. Dunque, si può affermare che la topografia influisce sull'incertezza, soprattutto del metodo automatico. Pertanto, nel caso di topografie particolarmente complesse e con forti irregolarità locali è preferibile utilizzare il metodo dei parametri topografici.

La topografia del Dente6 e del Dente11 è più regolare, in quanto sembra non esserci eteroschedasticità nella distribuzione delle altezze lungo x , ma possiamo ipotizzare le gaussiane della distribuzione stocastica delle altezze con uguale scarto tipo. In questo caso, dunque l'effetto della topografia distorce meno le performance dei metodi e risultati sembrano essere privi di *bias*.

Lo studio di questi due denti, infatti, non contraddice le previsioni secondo cui non c'è una differenza sistematica tra i due metodi; le bande di incertezza si sovrappongono e i t-test portano alla conclusione che l'ipotesi nulla non può essere rifiutata con una significatività anche superiore rispetto al 5%. Lo stimatore del metodo automatico, in entrambi i casi, sembra sottostimare dell'ordine dell'1% il calcolo del volume del danno totale. Per questo tipo di topografie, quindi, è indifferente l'utilizzo di entrambi i metodi topografici.

Tutti e tre i denti (Dente1, Dente2, Dente3) mostrano però che l'incertezza relativa dei valori medi è inferiore per il metodo di Abbott-Firestone (50% circa). Perciò essendo la dispersione dei risultati inferiore, è preferibile utilizzare questa valutazione nel caso sia richiesta una precisione ancora superiore. Uno dei motivi alla base di questo è certamente la numerosità dei campioni su cui vengono stimate le medie. La numerosità del campione del metodo parametrico è sempre superiore. Il numero dei campioni, n , impatta sull'intervallo di confidenza in modo inversamente proporzionale $\propto \frac{1}{\sqrt{n}}$ (impatta anche sui gradi di libertà per il calcolo del quantile della t-Student, sebbene siano stati fissati a 30), pertanto maggiore è la numerosità del campione, più si riduce l'intervallo della stima intervallare a parità di livello di fiducia.

Il secondo caso studio relativo al composito rinforzato con particelle ceramiche in SiC, data l'usura localizzata definita dai parametri di prova del tribo-test lineare e l'estrazione di una regione di analisi superficiale limitata intorno alla traccia di usura, ha permesso di limitare il fattore topografia e quindi eliminare la sua influenza diversa sui risultati dei metodi numerici applicati, portando a una maggiore confrontabilità dei metodi topografici indagati. Infatti, i t-test sul volume del danno totale medio ha

confermato la compatibilità nominale tra il metodo automatico e parametrico non rilevando alcuna differenza significativa con una significatività del 5%. Restano invariate le considerazioni sulle migliori performance del metodo parametrico dovute ad una precisione più elevata, legate principalmente alla numerosità dei campioni.

La geometria piana e l'assenza di forma 3D del provino, ha permesso di effettuare un'ulteriore indagine in questa specifica applicazione perché ha permesso il superamento dei problemi computazionali legati allo sviluppo 3D della topografia. In particolare, è stato valutato che gli algoritmi di registrazione hanno un impatto sulle performance metrologiche dei metodi topografici.

In base a quello che definisce anche la produzione scientifica, per aumentare la precisione dei risultati e l'accuratezza dei metodi topografici è importante migliorare l'algoritmo ICP di registrazione tra le nuvole di punti con altre tecniche di *image processing*, come le tecniche di rilevamento dei bordi o di identificazione dei punti chiave (ad esempio il SURF utilizzato in questo caso studio). L'implementazione degli algoritmi di *features recognition* riduce gli errori relativi alla sovrapposizione delle nuvole di punti, pertanto la differenza tra la superficie prima e dopo l'usura (necessaria per la valutazione del volume di usura e la visualizzazione della geometria dell'usura) è migliore. Di conseguenza i metodi topografici automatico e parametrico, come mostrato dai t-test sui volumi del danno totale medi, hanno un bias nei risultati minore e quindi un'accuratezza dei risultati superiore. L'ipotesi che la differenza delle medie dei volumi calcolati coi metodi topografici sia nulla non è rifiutabile con un livello di significatività superiore rispetto ad una registrazione con un semplice ICP tradizionale.

Perciò, se la topografia lo permette, è importante non limitarsi ad utilizzare l'ICP singolo; il vantaggio, oltre che metrologico, è computazionale, perché la fase iniziale di identificazione dei punti chiave, permette la rilevazione delle corrispondenze dell'ICP immediata, riducendo le iterazioni dell'algoritmo. La complessità esplose a livello implementativo invece, nella rilevazione di immagini 2D del campione e nella scrittura di un numero considerevole di righe di codice per la gestione delle diverse fasi dell'algoritmo.

Dal punto di vista delle incertezze relative invece, la registrazione non ha nessuna influenza sulla dispersione dei risultati, che rimangono inalterati in termini di variabilità, cioè 2% per il metodo automatico e 0,5% per il metodo parametrico. Quindi la migliore accuratezza conseguita, non è seguita da un maggior grado di precisione.

8 Bibliografia e Sitografia

1. Straffellini G Friction and Wear Methodologies for Design and Control. Springer; 2015.
2. Zum Gahr K-H Microstructure and wear of materials vol. 10. Elsevier; 1987.
3. Whittenton E P, Blau P J A comparison of methods for determining wear volumes and surface parameters of spherically tipped sliders 1988 124:291–309.
4. Stachowiak G W, Batchelor A W, Stachowiak G B Experimental methods in tribology. Amsterdam:Elsevier; 2004.
5. http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/MONOGRAFIE2004/Tribologia_parte2.pdf
6. Kalpakijan, S., Schmid, S.R.: “Manufacturing Engineering and Technology” Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River – New Jersey, 2001.
7. Bruzzone, A. A. G., Costa, H. L., Lonardo, P. M., & Lucca, D. A. (2008). Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2), 750–769.
8. Miyoshi, K., Ishibashi, K., & Suzuki, M. (2008). Surface characterization techniques in wear of materials. *ASTM Special Technical Publication*, 1501 STP(9), 126–133.
9. Curà, F., & Mura, A. (2013). Experimental procedure for the evaluation of tooth stiffness in spline coupling including angular misalignment. *Mechanical Systems and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.033>
10. F. Curà, A. Mura, V. Cuffaro, M. Facchini, “Test Rig for Spline Couplings Working in Misaligned Conditions”, *AIAS 2012 – 075*
11. Curà, F., & Mura, A. (2017). Evaluation of the fretting wear damage on crowned splined couplings. *Procedia Structural Integrity*.
12. Bill, R. C. (1982). Review of factors that influence fretting wear.
13. M.P. Swolinski, T.N Farris, “Mechanics of fretting fatigue crack formation” , *Wear* 198 (1996), 93-107
14. T. Kimura, K. Sato, “Simplified method to determine contact stress distribution and stress intensity factors in fretting fatigue” , *International Journal of Fatigue* 25 (2003), 633-640
15. J. Ding, S.B. Leen, I.R. McColl, “The effect of slip regime on fretting wear-induced stress evolution” ,*International Journal of Fatigue* 26 (2004), 521-531
16. D.W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, C.B. Elliott, “Fretting Fatigue: Current Technology and Practices” , *ASTM STP* 1367, 2000
17. Berruti, Rossetto, *Appunti per le lezioni di elementi di costruzioni di macchine*, Politecnico di Torino, 2008
18. Hu, B., Peng, L., Yang, Y., & Ding, W. (2010). Effect of solidification conditions on microstructure, mechanical and wear properties of Mg-5Al-3Ca-0.12Sr magnesium alloy. *Materials and Design*, 31(8), 3901–3907.
19. Dong, R., Zhu, W., Zhao, C., Zhang, Y., & Ren, F. (2018). Microstructure, Mechanical Properties, and Sliding Wear Behavior of Spark Plasma Sintered Ti-Cu Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 49(12), 6147–6160.
20. Niemczewska-Wójcik, M., Mańkowska-Snopczyńska, A., & Piekoszewski, W. (2013). The investigation of wear tracks with the use of noncontact measurement methods. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(2), 158–167.
21. Zhang, Z., Zhang, L., & Mai, Y. W. (1997). Modeling steady wear of steel/Al₂O₃-Al particle reinforced composite system. *Wear*. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00100-2)
22. Zhang, Z. F., Zhang, L. C., & Mai, Y. W. (1995). Wear of ceramic particle-reinforced metal-matrix composites. *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/bf00353019>

23. Callister W.D., ‘‘Scienza e Ingegneria dei Materiali’’, 2° ed. EdiSES srl, Napoli, 2008
24. Daniel, A. A., Murugesan, S., Manojkumar, M., & Sukkasamy, S. (2017). Dry sliding wear behaviour of aluminium 5059/SiC/MoS₂ hybrid metal matrix composites. *Materials Research*.
25. <http://www.klueber.co.kr/index/images/pdf/Lubricant-testing.pdf>
26. ASTM International. (2017). ASTM G99-17, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. *Annual Book of ASTM Standards*.
27. <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>
28. Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). Production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*.
29. Zhu, M. H., & Zhou, Z. R. (2011). On the mechanisms of various fretting wear modes. *Tribology International*.
30. Borgonovo, C., & Apelian, D. (2011). Manufacture of aluminum nanocomposites: A critical review. In *Materials Science Forum*.
31. Maculotti, G., Feng, X., Su, R., Galetto, M., & Leach, R. (2019). Residual flatness and scale calibration for a point autofocus surface topography measuring instrument. *Measurement Science and Technology*, 30(7).
32. Maculotti, G., Feng, X., Galetto, M., & Leach, R. (2018). Noise evaluation of a point autofocus surface topography measuring instrument. *Measurement Science and Technology*, 29(6).
33. ISO 25178-3 2012 Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 3: Specification Operators (International Organisation for Standardization)
34. ISO 25178-2 2012 Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters (International Organisation for Standardization)
35. Giusca C L and Leach R K 2013 Calibration of the Metrological Characteristics of Coherence Scanning Interferometers (CSI) and Phase Shifting Interferometers (PSI). NPL Good Practice Guide No. 127 (Teddington, UK: National Physical Laboratory)
36. ISO 25178-604 2013 Geometrical Product Specification (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 604: Nominal Characteristics of Non-Contact (Coherence Scanning Interferometry) Instruments (International Organisation for Standardization)
37. ISO/FDIS 25178-600 2018 Geometrical Product Specification (GPS)—Surface Texture: Areal—Part 600: Metrological Characteristics for Areal Topography Measuring Methods (International Organisation for Standardization)
38. Leach R K 2011 Optical Measurement of Surface Topography (Berlin: Springer)
39. Leach R K 2013 Characterization of Areal Surface Texture (Berlin: Springer)
40. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC and IUPAP 2008 Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures) (JCGM 100)
41. Colbert R S, Krick B A, Dunn A C, Vail J R, Argibay N, Sawyer W G Uncertainty in pin-on-disk wear volume measurements using surface scanning techniques *Tribol Lett* 2011 42:129–31.
42. Giulio Barbato, Alessandro Germak, Gianfranco Genta. *Misurare per decidere. Misure e statistica di base* (Torino: Esculapio)
43. ISO 14253-1. (2013). Geometrical product specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 1-Part 2.
44. P. Besl, N.M. (1992). A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14, 239–256.
45. Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*.
46. Takimoto, R. Y., de Sales Guerra Tsuzuki, M., Ueda, E. K., Sato, A. K., de Castro Martins, T., Cousseau, T., Tanaka, D., & Sinatora, A. (2016). Rough Surface Wear Analysis Using Image Processing Techniques. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), 7–12.

47. Lowe, D.G. (1999). Object recognition from local scale- invariant features. In Proc. of the International Conference on Computer Vision, Corfu, 1150–1157.
48. Dong, W. and Stout, K. (1995). An integrated approach to the characterization of surface wear I: Qualitative characterization. *Wear*, 181/183, Part 2, 700 – 716. 10th International Conference on Wear of Materials.
49. ASTM International. (2016). ASTM G40 - Standard Terminology relating to Wear and Erosion. ASTM International.
50. Bayer R G Mechanical Wear Fundamental and Testing. New York, NY, USA: Marcel Dekker Inc.; 2004.
51. Aksulu M, Palabiyik M Uncertainty of Wear Rate and Coefficient of Friction for a Polymer Wear Experiment in a pad-on-disc Tribotester. Proc. 9th Bienn. ASME Conf. Eng. Syst. Des. Anal., 2008, p. 1–6.
52. D’Amato R, Calvo R, Ruggiero A, Gómez E Measurement capabilities for ball bearing wear assessment *Procedia Manuf* 2017 13:647–54.
53. Bennett, J. M., & Dancy, J. H. (1981). Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces. *Applied Optics*.
54. Mironov, V. L. (2004). Fundamentals of Scanning Probe Microscopy. In THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES INSTITUTE OF PHYSICS OF MICROSTRUCTURES.
55. https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_a_forza_atmica
56. Ruprecht, A. K., Wiesendanger, T. F., & Tiziani, H. J. (2004). Chromatic confocal microscopy with a finite pinhole size. *Optics Letters*.
57. https://it.wikipedia.org/wiki/Microscopio_confocale
58. <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-filtration-techniques.html>
59. Blateyron, F. (2006). New 3D parameters and filtration techniques for surface metrology. *Quality Magazine*.
60. Valigi M C, Logozzo S, Affatato S New challenges in tribology: Wear assessment using 3D optical scanners *Materials (Basel)* 2017 10:1–13.
61. Fleming G J P, Reilly E, Dowling A H, Addison O Data acquisition variability using profilometry to produce accurate mean total volumetric wear and mean maximum wear depth measurements for the OHSU oral wear simulator *Dent Mater* 2016 32:e176–84.
62. Niemczewska-Wójcik M, Mańkowska-Snopczyńska A, Piekoszewski W The investigation of wear tracks with the use of noncontact measurement methods *Arch Civ Mech Eng* 2013 13:158–67.
63. Baryshev S V., Erck R A, Moore J F, Zinovev A V., Tripa C E, Veryovkin I V. Characterization of surface modifications by white light interferometry: applications in ion sputtering, laser ablation, and tribology experiments. *J Vis Exp* 2013 m:1–16.
64. Waterworth A Quantitative characterisation of surface finishes on stainless steel sheet using 3D surface topography analysis. University of Huddersfield, 2006.
65. Nastruzzi, A., Cicerchia, F., Fortini, A., & Nastruzzi, C. (2021). Gold hard anodized (GHA) materials with antimicrobial surface properties: mechanical, tribological, and microbiological characterization. *Emergent Materials*.
66. O. Flys, Calibration Procedure and Industrial Applications of Coherence Scanning Interferometer, 2016.
67. G. Maculotti, M.Galetto, Advanced Methods for the Mechanical and Topographical Characterization of Technological Surfaces, Politecnico di Torino, 2021.

68. Lemm, J. D., Warmuth, A. R., Pearson, S. R., & Shipway, P. H. (2015). The influence of surface hardness on the fretting wear of steel pairs-Its role in debris retention in the contact. Tribology International.
69. American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM G133-05: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. Annual Book of Standards.